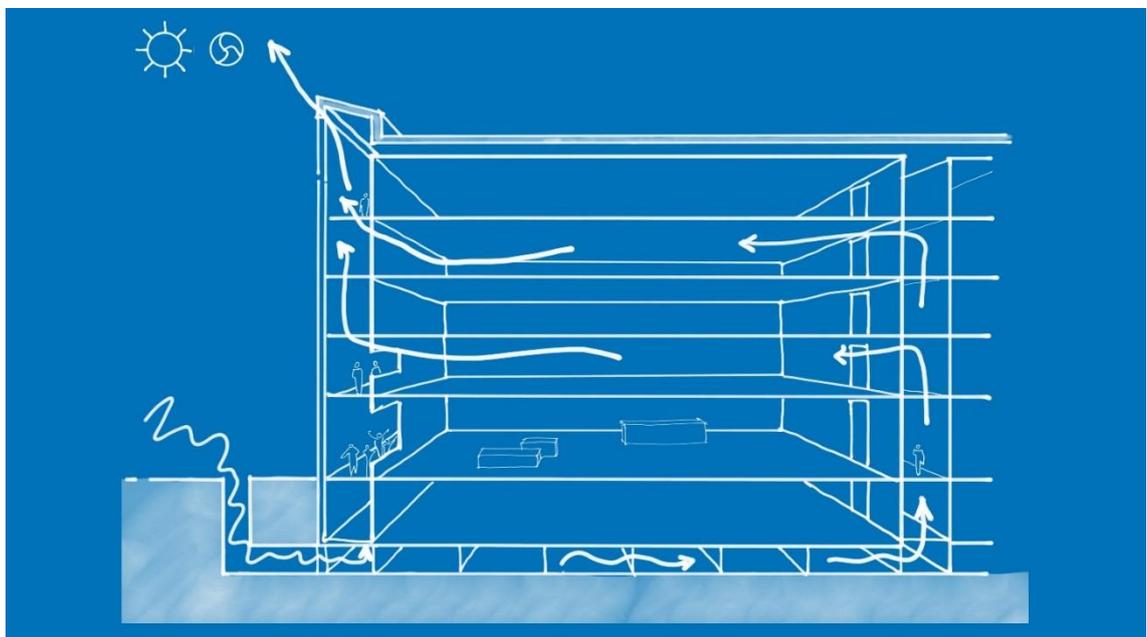


# Low-Tech-Gebäudekonzepte für Museumsdepots

## Potenzialstudie zu Low-Tech-Gebäudekonzepten für Museumsdepots am Beispiel eines zentralen Lagers für das Deutsche Museum in München



### Forschungsbericht

<b>Forschungsstelle</b>	Technische Universität München Arcisstraße 21 80333 München
<b>Projektleitung</b>	Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen
<b>Projektbearbeitung</b>	David Briels, M.Sc. +49 89 289 23815 david.briels@tum.de
<b>Fördermittelgeber</b>	Deutsches Museum
<b>Datum</b>	München, den 31.01.2020



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>X</b>
<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1. Ziel des Forschungsvorhabens .....	2
1.2. Forschungsansatz.....	3
1.3. Methodik .....	3
<b>2. Grundlagen .....</b>	<b>5</b>
2.1. Präventive Konservierung .....	5
2.2. Konservatorisches Raumklima .....	6
2.2.1. Relative Feuchte .....	6
2.2.2. Temperatur .....	6
2.2.3. Gleitklima .....	7
2.2.4. Richtlinien und Normen.....	7
2.2.5. Klimakorridor Deutsches Museum .....	9
2.3. Existierende Gebäudekonzepte für Archive und Depots .....	10
2.3.1. Kölner Modell – natürliche, aktive Klimatisierung.....	11
2.3.2. Schleswiger Modell – natürliche, passive Klimatisierung .....	12
2.3.3. Low Energy Storage .....	13
2.4. Low-Tech-Ansätze .....	14
2.4.1. Geschlossene Gebäudehülle.....	14
2.4.2. Infiltration .....	14
2.4.3. Wärmedämmung .....	14
2.4.4. Thermische und hygrische Speichermasse .....	15
2.4.5. Ungedämmte Bodenplatte .....	15
2.4.6. Zonierung.....	16
2.4.7. Haus-in-Haus Prinzip .....	16
2.5. Energiekonzepte .....	16
2.5.1. Vollklimaanlage.....	16
2.5.2. Passivlüftung.....	16
2.5.3. Passivlüftung und Entfeuchtung.....	17
2.5.4. „Conservation Heating“ .....	17

<b>3. Low-Tech-Gebäudekonzept</b>	<b>18</b>
3.1. Klimaanalyse	19
3.1.1. Lufttemperatur	19
3.1.2. Relative Außenluftfeuchte	20
3.1.3. Carrier-Diagramm	21
3.2. Modulares Haus-in-Haus Konzept	22
3.3. Natürliche Lüftung und Erdkanal	23
3.4. Dezentrale Lüftung und Heizung	24
<b>4. Hygrothermische Gebäudesimulation</b>	<b>25</b>
4.1. Simulationsparameter	25
4.1.1. Wetterdaten	25
4.1.2. Bodentemperatur	27
4.1.3. Simulationszeitraum und Zeitschritt	28
4.2. Simulationsmodell	29
4.2.1. Multizonen-Gebäudedurchströmungsmodell	29
4.2.2. Angepasstes Simulationsmodell	29
4.2.3. Wandaufbauten und Materialkennwerte	30
4.2.4. Materialien Exponate	32
4.3. Simulationsvarianten und Ergebnisse	33
4.3.1. Variante 1: Materialität Exponate	33
4.3.2. Variante 2: Infiltrationsluftwechsel	34
4.3.3. Variante 3: Luftwechselrate	35
4.3.4. Variante 4: Puffermaterial Erdkanal	36
4.3.5. Variante 5: Nutzungsszenarien	38
4.3.6. Variante 6: Heizen	40
4.3.7. Variante 7: optimierte Heizung und Entfeuchtung	41
4.4. Zukunftswetterdaten	43
4.4.1. IPCC Szenarien	43
4.4.2. Zukunftswetterdatensätze	44
4.4.3. Simulationsergebnisse	45
<b>5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Brandschutz</b>	<b>46</b>
5.1. Kostenabschätzung	46
5.1.1. Statistische Kostenkennwerte BKI 2019	46
5.1.2. Kostenschätzung Bauwerk gesamt	46
5.1.3. Kostenschätzung Erdkanal	47
5.1.4. Kostenschätzung Puffermaterial	47
5.1.5. Kostenschätzung Lüftungsanlage	47
5.1.6. Zusammenfassung Kostenschätzung	48
5.2. Brandschutz	50
5.2.1. Modulare Bauweise	50
5.2.2. Luftführung und Brandabschnitte	50

<b>6. Fazit.....</b>	<b>52</b>
6.1. Hygrothermische Pufferung.....	53
6.2. Dezentrale RLT und konservatorisches Heizen.....	54
6.3. Haus-in-Haus Konzept.....	55
6.4. Vertikale Brandabschnitte .....	56

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Blick in eines der Depots [1] .....	1
Abbildung 2: Gleitklima für Temperatur und relative Feuchte (Quelle: eigene Darstellung).....	7
Abbildung 3: Anforderungen an das Raumklima Kategorie A nach ASHRAE® 2019 [8, 24.24] .....	8
Abbildung 4: Historisches Stadtarchiv der Stadt Köln (Quelle: WDR/Schmitz [12]) .....	11
Abbildung 5: Landesarchiv Schleswig-Holstein (Quelle: Padfield [13]) .....	12
Abbildung 6: Low Energy Storage (Quelle: Padfield [14]) .....	13
Abbildung 7: Simulation Erdreichtemperatur Depot Ribe [14].....	15
Abbildung 8: Mollier-Diagramm Luftentfeuchtung.....	17
Abbildung 9: Low-Tech-Gebäudekonzept .....	18
Abbildung 10: Außenlufttemperatur Standort München .....	19
Abbildung 11: Relative Außenluftfeuchte im Jahres- und Tagesverlauf .....	20
Abbildung 12: Relative Außenluftfeuchte als monatlich gemittelte Stundenwerte .....	20
Abbildung 13: Carrier-Diagramm mit Zielkorridor .....	21
Abbildung 14: Modulares Haus-in-Haus Prinzip .....	22
Abbildung 15: Luftführung Detail .....	23
Abbildung 16: Gebäudedurchströmung.....	23
Abbildung 17: Temperatur und relative Luftfeuchte Feuchtereferenzjahr München (Quelle: WUFI® Plus).....	26
Abbildung 18: Sonneneinstrahlung und Schlagregen Feuchtereferenzjahr München (Quelle: WUFI® Plus).....	27
Abbildung 19: Verteilung Bodentemperatur im Jahresverlauf .....	28
Abbildung 20: Optionales Klima für Bodentemperatur (Quelle: WUFI® Plus) .....	28
Abbildung 21: Multizonen Gebäudedurchströmungsmodell.....	29
Abbildung 22: Simulationsergebnisse Variante 1 – Exponate .....	34
Abbildung 23: Simulationsergebnisse Variante 2 – Infiltrationsluftwechsel .....	35
Abbildung 24: Simulationsergebnisse Variante 3 – Luftwechselrate.....	36
Abbildung 25: Zusätzliches Puffermaterial Erdkanal .....	36

Abbildung 26: Simulationsergebnisse Variante 4 – Puffermaterial Erdkanal .....	37
Abbildung 27: Simulationsergebnisse Detail Variante 4 – Puffermaterial Erdkanal .....	37
Abbildung 28: Nutzungsszenario gelegentliche Nutzung.....	39
Abbildung 29: Nutzungsszenario Ausstellungswechsel.....	39
Abbildung 30: Simulationsergebnisse Detail Variante 5 - Nutzungsszenarien.....	40
Abbildung 31: Simulationsergebnisse Variante 6 - Heizen .....	41
Abbildung 32: Simulationsergebnisse Variante 7 - optimierte Heizung und Entfeuchtung.....	42
Abbildung 33: IPCC Szenarien zur Treibhausgasemission und Oberflächen- erwärmung [23] .....	43
Abbildung 34: Simulationsergebnisse Zukunftswetterdatensätze .....	45
Abbildung 35: Kostenschätzung Bauwerk .....	46
Abbildung 36: Kostenschätzung Erdkanal.....	47
Abbildung 37: Kostenschätzung Puffermaterial.....	47
Abbildung 38: Kostenschätzung hygrothermische Konditionierung .....	49
Abbildung 39: Modulare Bauweise; innere Brandwände .....	50
Abbildung 40: Luftführung und Brandabschnitte .....	50
Abbildung 41: Fazit Low-Tech-Gebäudekonzept .....	52
Abbildung 42: Schema hygrothermische Pufferung .....	53
Abbildung 43: Schema dezentrale RLT und konservatorisches Heizen .....	54
Abbildung 44: Schema Haus-in-Haus Konzept .....	55
Abbildung 45: Schema vertikale Brandabschnitte .....	56

# Literaturverzeichnis

- [1] R. Würschinger, Der Blog des Deutschen Museums: Jäger des verlorenen Glases. [Online] Verfügbar unter: <https://www.deutsches-museum.de/blog/blog-post/2018/08/17/jaeger-des-verlorenen-glases/>. Zugriff am: 31. Januar 2020.
- [2] Deutsches Museum, Wettlauf gegen die Zeit. [Online] Verfügbar unter: <https://www.deutsches-museum.de/presse/pressearchiv/presse-2018/depotbrand/>. Zugriff am: 13. Januar 2020.
- [3] Deutsches Museum, Deutsches Museum: Leitbild. [Online] Verfügbar unter: <https://www.deutsches-museum.de/wir-ueber-uns/leitbild/>. Zugriff am: 13. Januar 2020.
- [4] ICOM Deutschland e.V., Mission – Vision – Geschichte. [Online] Verfügbar unter: <https://icom-deutschland.de/de/icom-deutschland/mission-vision-geschichte.html>. Zugriff am: 24. Januar 2020.
- [5] R. Kilian, Klimastabilität historischer Gebäude: Bewertung hygrothermischer Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013. Stuttgart: Fraunhofer Verl., 2013.
- [6] V. Huckermann et al., „Konservatorische Anforderungen“, Themeninfo, II, S. 8–10, 2014, <http://www.bine.info/publikationen/themeninfos/publikation/museen-nachhaltig-sanieren/konservatorische-anforderungen-raumklima/>. Zugriff am: 20. Januar 2020.
- [7] M. Ehmann, „Ressourcenschonende Lösungsstrategien für ein Lager-Gebäude am Beispiel eines Depots für das Deutsche Museum“. Master Thesis, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, Technische Universität München, München, 2017.
- [8] K. Gertis und T. Schmidt, „Zur Ermittlung der Sorptionsenthalpie von Baustoffen“, Bauphysik, Jg. 37, Nr. 2, S. 71–80, 2015.
- [9] „Chapter 24: Museums, Galleries, Archives and Libraries“ in 2019 ASHRAE® Handbook Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications (S-I Edition), American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Hg., 2019, 24.1-24.46.
- [10] M. R. Sagstetter, „Klimatisierungskonzepte in jüngeren Archivgebäuden in Deutschland“, Archivalische Zeitschrift, Jg. 86, Nr. 1, S. 323–356, 2004.
- [11] C. Kruse, „Neubau, Adaption, Passivhaus: neuere deutsche Archivbauten“, Atlanti, Jg. 22, Nr. 1, S. 133–140, 2012, [www.ias-trieste-maribor.eu/fileadmin/atti/2012/Kruse.pdf](http://www.ias-trieste-maribor.eu/fileadmin/atti/2012/Kruse.pdf). Zugriff am: 3. Januar 2019.
- [12] S. Maurer/dpa/ddp, Das Historische Kölner Stadtarchiv. [Online] Verfügbar unter: <https://www1.wdr.de/archiv/stadtarchiv-ubahn/archiveinsturz302.html>. Zugriff am: 20. Januar 2020.
- [13] T. Padfield und P. K. Larsen, Low Energy Air Conditioning of Archives. [Online] Verfügbar unter: [http://www.conservationphysics.org/arnemag/arnemag\\_nrwch.pdf](http://www.conservationphysics.org/arnemag/arnemag_nrwch.pdf). Zugriff am: 20. Januar 2020.
- [14] T. Padfield, M. Ryhl-Svendsen, P. K. Larsen und L. Aasbjerg Jensen, „A review of the physics and the building science which underpins methods of low energy storage of museum and archive collections“, Studies in Conservation, Jg. 63, sup1, S. 209–215, 2018.

- [15] J. E. Christensen und H. Janssen, „Passive hygrothermal control of a museum storage building“ (English), Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, 2011, <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84870206224&partnerID=40&md5=6f66bc863a0d09bee773385bb618de08>.
- [16] Carbon Trust, Closing the gap: Lessons learned on realising the potential of low carbon building design. [Online] Verfügbar unter: <https://www.carbontrust.com/media/81361/ctg047-closing-the-gap-low-carbon-building-design.pdf>. Zugriff am: 28. Januar 2020.
- [17] Fraunhofer IBP, Was ist WUFI®? [Online] Verfügbar unter: <https://wufi.de/de/software/was-ist-wufi/>. Zugriff am: 31. Januar 2020.
- [18] Fraunhofer IBP, WUFI® Plus. [Online] Verfügbar unter: <https://wufi.de/de/software/wufi-plus/>. Zugriff am: 31. Januar 2020.
- [19] C. Zürcher und T. Frank, Bauphysik. Bau und Energie: Leitfaden für Planung und Praxis. Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 1998.
- [20] Passivhaus Institut, Qualitätsanforderungen an Passivhäuser. [Online] Verfügbar unter: [https://passiv.de/de/02\\_informationen/02\\_qualitaetsanforderungen/02\\_qualitaetsanforderungen.htm](https://passiv.de/de/02_informationen/02_qualitaetsanforderungen/02_qualitaetsanforderungen.htm). Zugriff am: 31. Januar 2020.
- [21] J. Zeller, „Abschätzung der Infiltration nach DIN 1946-6 "Lüftung von Wohnungen": Vergleich mit anderen Verfahren und Würdigung der Ergebnisse“ in 8. Internationales BUILDAIR-Symposium, Hannover, 2013.
- [22] IPCC, Emissions Scenarios. [Online] Verfügbar unter: <https://www.ipcc.ch/report/emissions-scenarios/?idp=35>. Zugriff am: 31. Januar 2020.
- [23] N. L. Izquierdo, Greenhouse gas emissions scenarios and surface temperature projections. [Online] Verfügbar unter: <https://www.grida.no/resources/6173>. Zugriff am: 31.01.2020.
- [24] BKI Baukosten 2019: Statistische Kostenkennwerte. Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH, 2019.
- [25] „Gebäude Neubau“ in BKI Baukosten 2019: Statistische Kostenkennwerte, Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH, 2019.
- [26] „Bauelemente Neubau“ in BKI Baukosten 2019: Statistische Kostenkennwerte, Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH, 2019.
- [27] „Positionen Neubau“ in BKI Baukosten 2019: Statistische Kostenkennwerte, Stuttgart: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH, 2019.
- [28] Bayerische Bauordnung: BayBO, 2007.

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Tolerierte Raumklimaschwankungen nach ASHRAE® 2019 [9, 24.24].....	8
Tabelle 2: Gewählter Klimakorridor .....	9
Tabelle 3: Wandaufbauten und Materialkennwerte .....	31
Tabelle 4: Annahmen Lagerung und Material Exponate.....	32
Tabelle 5: Vergleich Zukunftswetterdaten .....	44
Tabelle 6: Übersicht Annahmen Kostenschätzung.....	48

# 1. Einleitung

Die Sammlung eines Museums kann meist nur zu einem gewissen Teil dauerhaft in den vorhandenen Ausstellungsräumen untergebracht werden. Eine große Anzahl von Exponaten muss in der Regel in geeigneten Lagerräumen aufbewahrt werden, wobei sich aus konservatorischen Gründen bestimmte Anforderungen an das dort vorherrschende Raumklima (Lufttemperatur und relative Luftfeuchte) ergeben. Im Falle des Deutschen Museums in München lagern ca. 80 % des gesamten Bestandes an Ausstellungsstücken in dezentral angemieteten Depots (Abbildung 1). Diese haben jedoch unter anderem drei wesentliche Nachteile:

- Hohe Mietkosten
- Hohe Betriebskosten (Raumklimatisierung)
- Hohes Risiko (Raumklima, Brandschutz, Einbruchschutz)



Abbildung 1: Blick in eines der Depots [1]

Neben den hohen Mietkosten extern angemieteter Lagerhallen schlagen insbesondere hohe Betriebskosten zu Buche. Diese sind zum einen auf die hohen Anforderungen an ein konservatorisches Raumklima, teilweise aber auch auf ungeeignete bauliche Voraussetzungen der Hallen zurückzuführen. Somit kann ein geeignetes Raumklima häufig

nur mit sehr hohem energetischem Aufwand sichergestellt werden, oder es besteht sogar das Risiko, die konservatorischen Anforderungen nicht einhalten zu können. Hinzu kommen zusätzliche Risiken, wie ein Brand in einem Depot in Ingolstadt Ende 2018 [2] zeigte. Daher wird vom Deutschen Museum wiederkehrend die Errichtung eines großen, eigenen Zentraldepots mit optimierten Voraussetzungen angestrebt.

Die Planung eines solchen Gebäudes ist im Kontext der aktuell sehr brisanten gesellschaftlichen Debatte des Klimawandels und der europäischen sowie deutschen Klimaschutzziele zu sehen. Das Deutsche Museum trägt als eines der „großen deutschen Forschungsmuseen von gesamtstaatlicher Bedeutung“ [3] - insbesondere auch durch die finanzielle Förderung durch den Freistaat Bayern, Bund und Länder - die Verantwortung, ebenfalls einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten. Somit sollte ein derartiges Gebäude ganzheitlich nachhaltig geplant werden, um den Verbrauch von Energie und Ressourcen unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus (Planung, Konstruktion, Inbetriebnahme, Betrieb/Instandhaltung und Rückbau) zu minimieren. Zudem soll durch eine robuste Planung die Lebensdauer solcher Gebäude erhöht werden, um dem Anspruch, die Exponate für die kommenden Generationen bewahren zu können, gerecht zu werden.

## 1.1. Ziel des Forschungsvorhabens

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden mögliche Umsetzungsstrategien für ein möglichst passives, optimiertes Gebäudekonzept ohne bzw. mit einem möglichst reduzierten Maß an Gebäudetechnik (Heizen, Kühlen, Lüften, Be- und Entfeuchten) entwickelt und untersucht. Ziel dabei ist es, mögliche architektonische und technische Konzepte zu definieren und hinsichtlich ihrer Machbarkeit und der jeweiligen Vor- und Nachteile zu bewerten.

Die beispielhaft am zentralen Depot für das Deutsche Museum erarbeiteten Forschungsergebnisse sollen eine generelle Übertragbarkeit auf den Bau zukunftsfähiger Museumsdepots gewährleisten und eine wegweisende Hilfestellung für reale Planungen bilden. Auch die teilweise Anwendbarkeit der Erkenntnisse auf Museumsgebäude an sich wird erwartet.

## 1.2. Forschungsansatz

Ansatz und Leitgedanke dieser Potentialanalyse ist ein ganzheitliches und hocheffizientes Gebäudekonzept, welches anstatt auf High-Tech auf möglichst einfache und robuste Low-Tech-Lösungen setzt. Hierbei spielen folgende Gesichtspunkte eine wesentliche Rolle:

- Reduzierte Investitionskosten
- Reduzierte Betriebskosten
- Reduzierte Wartungskosten
- Hohe Ressourceneffizienz
- Funktionssicherheit und robuster Betrieb
- Langlebigkeit
- Hohe Flexibilität

Diese Aspekte dienen als Basis für die Entwicklung und Untersuchung von Strategien sowie als Zielgröße für deren Optimierung. Gleichzeitig muss die Funktionalität immer an den konservatorischen Anforderungen an das Raumklima gemessen werden.

## 1.3. Methodik

Im Folgenden werden die Herangehensweise zur Bearbeitung und Beantwortung der Forschungsfrage aufgezeigt und die einzelnen Arbeitspakete kurz erläutert.

### **Grundlagenrecherche (Kapitel 2)**

Der Stand von Wissenschaft und Technik im beschriebenen Themenfeld wird umfangreich recherchiert und ausgewertet. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Analyse der Anforderungen an das konservatorische Raumklima, bestehender Strategien für Archiv- und Depotgebäuden sowie bereits realisierter Beispiele mit innovativen Energie- und Klimakzepten. Hieraus werden Vor- und Nachteile abgeleitet sowie insbesondere dort auftretende Probleme analysiert, um aus Fehlern zu lernen.

### **Entwicklung eines Low-Tech-Gebäudekonzepts (Kapitel 3)**

Aus den zuvor abgeleiteten Erkenntnissen werden Strategien kombiniert, weiterentwickelt und ergänzt. Dabei spielen insbesondere die folgenden Parameter eine besondere Rolle: Gebäudegeometrie und Zonierung, Bauweise und Materialien, bauphysikalische

Parameter (hygrothermisches Verhalten), (passive) Lüftungs- und Raumkonditionierungskonzepte sowie aktive Back-Up-Systeme. Daraus wird ein Low-Tech-Gebäudekonzept als Vorschlag für ein Museumsdepot definiert

#### **Hygrothermische Gebäudesimulation (Kapitel 4)**

Um die entwickelten Strategien auf deren Funktionalität und Wirksamkeit zu testen sowie optimieren zu können, werden umfangreiche numerische Gebäudesimulationen durchgeführt. Um das hygrische, thermische sowie energetische Verhalten in Bezug auf das Raumklima darstellen und beurteilen zu können, wird eine dynamische, hygrothermische Gebäudesimulation mittels WUFI® Plus<sup>1</sup> angewandt. Um insbesondere auch passive Lüftungskonzepte abzubilden, wird ein komplexes Gebäudedurchströmungsmodell in der Simulationssoftware implementiert.

#### **Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Brandschutz (Kapitel 5)**

Um die ökonomische Umsetzbarkeit des entwickelten Konzepts einschätzen zu können, wird eine grobe Kostenabschätzung der vorgeschlagenen Strategien durchgeführt. Zudem werden sich ergebende Vorteile und Synergieeffekte durch einen minimierten Technik-Einsatz aufgeführt und insbesondere das Gebäudekonzept vom Aspekt des Brandschutzes her untersucht.

#### **Ableiten von Planungsempfehlungen (Kapitel 6)**

Abgeschlossen wird die Studie mit einer Zusammenfassung der vorgeschlagenen Low-Tech-Strategien inklusive einer Bewertung deren Effektivität anhand der Simulationsergebnisse. Zudem werden daraus Planungsempfehlungen für ein Low-Tech-Museumsdepot abgeleitet.

---

<sup>1</sup> <https://wufi.de/de/software/wufi-plus/>

## 2. Grundlagen

Um eine ganzheitliche Betrachtung im Rahmen dieser Studie zu gewähren, werden im Folgenden zunächst einige theoretische Grundlagen erläutert. Hierzu zählen zum einen die sogenannte **präventive Konservierung** und insbesondere das **konservatorische Raumklima** als maßgebliche Rahmenparameter für die Planung von Depots. Zum anderen werden einige der wichtigsten Beispiele für historische und existierende **Gebäudekonzepte** aufgezeigt. Darauf aufbauend, werden umgesetzte **Low-Tech-Ansätze** sowie **Energiekonzepte** analysiert.

### 2.1. Präventive Konservierung

Eine der Kernaufgaben von Museen, und somit auch von Depots und Archiven, ist der Schutz und die Bewahrung von beweglichen Kulturgütern und Naturalien [4]. Demnach geht es maßgeblich darum, Schädigungen der Exponate systematisch zu vermeiden. In der Bestandserhaltung und Restaurierung werden neben dem Schutz vor Brand, Vandalismus und Diebstahl insbesondere chemische, biologische und mechanische Schäden aufgeführt [5].

Innerhalb der Restaurierung hat sich in den letzten Jahrzehnten ein neues Fachgebiet, die sogenannte **Präventive Konservierung**, etabliert [6]. Hier werden insbesondere die Umgebungsbedingungen der Exponate in Betracht gezogen[6]:

- Klimatisierung (Temperatur, relative Feuchte, Schadstoffgehalt etc.)
- Tages- und Kunstlicht
- Schädlingsprävention
- Inventarisierung und Sammlungsmanagement
- Sicherheit und Brandschutz
- Museumslogistik
- Katastrophen und Notfallmanagement
- Gesetzgebung / Normen

Insbesondere der Aspekt der Klimatisierung spielt für ein ganzheitliches, nachhaltiges Gebäude- und Energiekonzept eine maßgebende Rolle.

## 2.2. Konservatorisches Raumklima

Etwa seit Anfang des 20. Jahrhunderts gibt es einen anhaltenden Fachdiskurs, um Richtlinien für optimale, raumklimatische Bedingungen im Sinne einer präventiven Konservierung festzulegen [7]. Einig ist man sich jedoch darüber, dass durch die relative Luftfeuchte sowie die Lufttemperatur eine Vielzahl von Schadensprozessen beeinflusst werden.

### 2.2.1. Relative Feuchte

Über physikalische Grundsätze des Wärme- und Stofftransports lässt sich unter anderem erklären, dass Materialien in ständigem Feuchtigkeits- und Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft stehen. Die Prozesse der Feuchtigkeitsaufnahme sowie der Feuchtigkeitsabgabe werden unter den Begriffen Adsorption bzw. Desorption zusammengefasst, welche abhängig von der relativen Luftfeuchte der Umgebungsluft und Materialparametern sind [8]. Wird Feuchtigkeit im Material aufgenommen, kann dies zu einem Quellen und somit zu Deformationen oder auch zu Festigkeitsverlusten von organischen Materialien führen [5, S. 29]. Wird dem Material hingegen Feuchtigkeit durch geringe relative Luftfeuchte entzogen, schrumpft und versprödet es. Hinzu kommen Spannungen im Materialverbund bei mehrschichtigen Materialien mit unterschiedlichen hygrischen Parametern [5, S. 29].

Zudem werden durch eine hohe Feuchtigkeit die chemischen Eigenschaften mancher Stoffe nachteilig verändert, was sich beispielsweise bei der Oxidation oder Korrosion von Metallen zeigt [5, S. 29]. Nicht zuletzt ist Feuchte eine wichtige Voraussetzung für das Wachstum von Schimmelpilzen und anderen Mikroorganismen [5, S. 29], durch deren Befall die Exponate stark geschädigt werden können.

### 2.2.2. Temperatur

Auch die Temperatur hat einen Einfluss auf chemische und biologische Verfallsprozesse, indem sie deren Geschwindigkeit bestimmt. Somit sind prinzipiell niedrigere Temperaturen für einige Materialien vorteilhafter [5, S. 30]. Ferner bewirken Temperaturschwankungen ebenfalls Dimensionsänderungen im Material, auch wenn diese Prozesse meist langsamer und weniger extrem ausfallen [5, S. 30-31].

### 2.2.3. Gleitklima

Nachdem zunächst vereinzelte Forscher und Organisationen wie ICOM<sup>2</sup>, ICCROM<sup>3</sup> oder ASHRAE<sup>4</sup> versucht haben, Richtwerte für optimale raumklimatische Bedingungen festzulegen, haben viele Museen und Sammlungen angestrebt, diese Sollwerte mit den immer aufwendigeren anlagentechnischen Lösungen möglichst „auf Strich zu fahren“.

Dies ging mit einem wachsenden Ressourcenverbrauch für die Anlagentechnik sowie enormem Energieverbrauch im Betrieb einher. Mit steigenden Energiepreisen und einem aufkommenden Bewusstsein für Nachhaltigkeitsthemen, wurden nach und nach diese Richtwerte im Hinblick auf den damit einhergehenden Energieverbrauch hinterfragt.

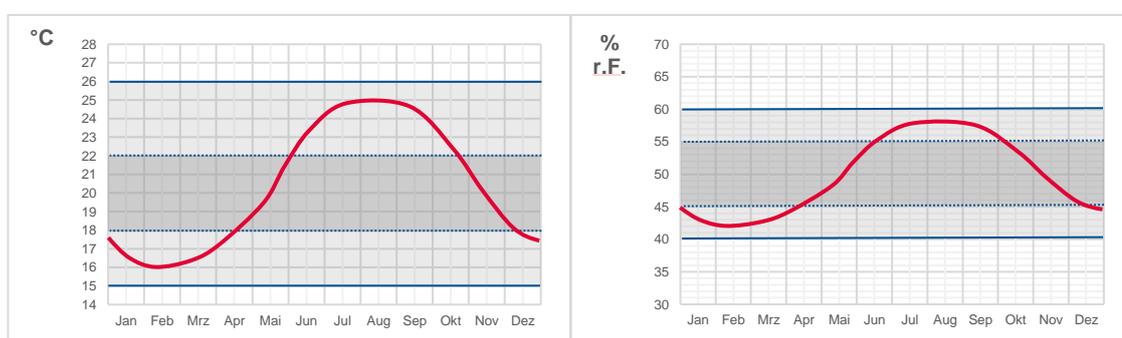


Abbildung 2: Gleitklima für Temperatur und relative Feuchte (Quelle: eigene Darstellung)

Daraus hat sich in der Fachwelt eine Tendenz entwickelt, insbesondere Kurzzeitschwankungen zu verhindern, aber ein jahreszeitliches Schwingen beziehungsweise saisonal gleitendes Raumklima in einem gewissen Klimakorridor zu akzeptieren (siehe Abbildung 2) [6].

### 2.2.4. Richtlinien und Normen

Der Ansatz des Gleitklimas findet sich auch heute in den gängigen Richtlinien und Normen wieder. In der neuesten Fassung aus dem Jahre 2019 des ASHRAE<sup>®</sup> Handbuchs finden sich im Kapitel 24 detaillierte Erfahrungswerte sowie Planungsempfehlungen für eine langfristige Erhaltung von Kulturgütern [9].

Unter anderem wird hier sehr dezidiert auf klimatische Anforderungen eingegangen (siehe Abbildung 3). Im Vergleich zu den Vorgängerversionen wird hier gänzlich auf Sollwerte verzichtet. Es wird hingegen darauf verwiesen, dass bei permanenten Sammlun-

<sup>2</sup> ICOM: International Council of Museums

<sup>3</sup> ICCROM: International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property

<sup>4</sup> ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning

gen das historische, jährliche Mittel für die relative Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur als Richtwert verwendet werden soll. Jedoch sollen folgende Grenzwerte in der Kategorie A (insbesondere auch für Neubauten) eingehalten werden [9, 24.24]:

- 35 % r.F. ≤ relative Luftfeuchte ≤ 65 % r.F.
- 10°C ≤ Lufttemperatur ≤ 25°C

Type of Collection and Building	Type of Control	Long-Term Outer Limits <sup>a</sup>	Annual Averages	Seasonal Adjustments from Annual Average <sup>b</sup>	Short-Term Fluctuations plus Space Gradients <sup>c</sup>	Collection Benefits and Risks <sup>d</sup>
Museums, Galleries, Archives and Libraries in modern purpose-built buildings or purpose-built rooms	AA Precision control, no seasonal changes to relative humidity	≥35% rh ≤65% rh ≥10°C ≤25°C	For permanent collections: historic annual average of relative humidity and temperature. In public display areas, human comfort temperatures can apply.	No change to relative humidity Increase by 5 K; Decrease by 5 K	±5% rh, ±2 K	Mold germination and growth, and rapid corrosion avoided. No risk of mechanical damage to most artifacts and paintings. Some metals, glasses, and minerals may degrade if rh exceeds a critical value. Chemically unstable objects deteriorate significantly within decades at 20°C, twice as fast each 5 K higher.
	A1 Precision control, seasonal changes in temperature and relative humidity	≥35% rh ≤65% rh ≥10°C ≤25°C		Increase by 10% rh. Decrease by 10% rh. Increase by 5 K; Decrease by 10 K	±5% rh, ±2 K	Mold germination and growth, and rapid corrosion avoided. No mechanical risk to most artifacts, paintings, photographs, and books; small risk of mechanical damage to high-vulnerability artifact. (Current knowledge considers the specifications A1 and A2 as causing the same low risk of mechanical damage to vulnerable collections. Slow seasonal adjustment of 10% rh is estimated to cause the same mechanical risk as rapid fluctuations of 5% rh, because of significant stress relaxation occurring within three months of a slow transition.) Chemically unstable objects deteriorate significantly within decades at 20°C, twice as fast each 5 K higher.
Temperature at or near human comfort	A2 Precision control, seasonal changes in temperature only	≥35% rh ≤65% rh ≥10°C ≤25°C		No change to relative humidity. Increase by 5 K; Decrease by 10 K	±10% rh, ±2 K	

Abbildung 3: Anforderungen an das Raumklima Kategorie A nach ASHRAE® 2019 [8, 24.24]

Hier spiegelt sich auch eine Tendenz im Fachdiskurs, den unteren Grenzwert für die Lufttemperatur abzusenken, wieder (vgl. 2.2.2). Auf diese wurde mit einer Absenkung von 5K des unteren Grenzwertes im Vergleich zur Vorgängerversion eingegangen.

Tabelle 1: Tolerierte Raumklimaschwankungen nach ASHRAE® 2019 [9, 24.24]

	Saisonale Schwankungen				Kurzfristige Schwankungen			
	Luftfeuchte		Lufttemperatur		Luftfeuchte		Lufttemperatur	
AA	-	-	+ 5K	- 5K	+ 5% rF	- 5% rF	+ 2K	- 2K
A1	+ 10% rF	- 10% rF	+ 5K	- 10K	+ 5% rF	- 5% rF	+ 2K	- 2K
A2	-	-	+ 5K	- 10K	+ 10% rF	- 10% rF	+ 2K	- 2K

Zudem werden je nach Kategorie, wie in Tabelle 1 dargestellt, saisonale und kurzzeitige Abweichungen vom jährlichen Mittelwert der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur in unterschiedlicher Höhe toleriert.

### 2.2.5. Klimakorridor Deutsches Museum

Das Deutsche Museum hat sich in Anlehnung an die bestehenden Richtlinien und die Grundtendenz im Fachdiskurs einen anzustrebenden Klimakorridor mit einem tolerierten Gleitklima festgelegt:

- **20°C +/- 2 K** jahreszeitlich gleitend
- **50 % r.F. +/- 5 %** jahreszeitlich gleitend
- min. **15°C** / max. **26°C** in Ausnahmefällen (max. 5-10 % des Jahres)
- min. **40 % r.F.** / max. **60 % r.F.** in Ausnahmefällen (max. 5-10 % des Jahres)
- **+/- 5 % r.F.** kurzzeitige Schwankungen

Im Hinblick auf die vorhergehenden Ausführungen kann diskutiert werden, ob die Temperaturgrenzwerte nach unten gelockert werden. Im Vergleich zu den ASHRAE® Grenzwerten entsprechen die Vorgaben des Deutschen Museums etwa der Kategorie A1. Somit wurde für diese Studie der folgende Klimakorridor als Kombination der beiden Richtwerte festgelegt, in welchem ein Gleitklima (siehe Abbildung 2) zugelassen wird:

Tabelle 2: Gewählter Klimakorridor

-	Jahresmittelwert	+	Zeitraum
- 2	<b>20°C</b>	+ 2	Kurzfristig schwankend
- 5	<b>50 % r.F.</b>	+ 5	
- 5	<b>20°C</b>	+ 6	Jahreszeitlich gleitend
- 10	<b>50 % r.F.</b>	+ 10	

## 2.3. Existierende Gebäudekonzepte für Archive und Depots

Bei den Archiven aus dem vorletzten Jahrhundert handelte es sich um Zweckbauten, bei welchen die Parameter des Raumklimas meist noch eine untergeordnete Rolle spielten und der Fokus mehr auf der „räumlichen Verteilung bzw. Zuordnung der verschiedenen Funktionsbereiche“ [10, S. 329] lag. Allein die Fensterflächen wurden nach damaligem Stand der Technik als eine Möglichkeit zur Beeinflussung des Raumklimas angesehen [10].

Mit neuen technischen Möglichkeiten wurden dann nach 1945 in Deutschland zahlreiche Archivneubauten mit Klimaanlage ausgeführt [11], was dazu führte, dass „künstlich klimatisierte ‚blinde‘ Speicherblöcke und fensterlose Magazintürme“ [10, S. 329] das Erscheinungsbild bestimmten. Diese aufwendigen anlagentechnischen Lösungen brachten jedoch auch einen starken Anstieg an verbrauchten Ressourcen für deren Herstellung sowie Energieaufwand für deren Betrieb mit sich.

In dieser Phase der zunehmenden Technisierung der Raumklimatisierung, stellt der Neubau des Historischen Archivs der Stadt Köln 1971 einen Wendepunkt in der Konzeptionierung von Archiven und Depotgebäuden dar [10]. Der Ansatz einer natürlichen, aktiven Klimatisierung mittels gezielter Querlüftung, wurde als sogenanntes „Kölner Modell“ in den nachfolgenden Jahren mehrfach rezipiert und nachgeahmt, sowie auch in neuen Konzepten adaptiert.

### 2.3.1. Kölner Modell – natürliche, aktive Klimatisierung



Abbildung 4: Historisches Stadtarchiv der Stadt Köln (Quelle: WDR/Schmitz [12])

Als erster Gegenentwurf zu den vollklimatisierten Archivbauten, setzt das „Kölner Modell“ auf folgende passive Maßnahmen [11]:

- Hygroskopischer Kalkputzmörtel
- Massive Bauweise (Vollziegel 49 cm)
- Vorhangfassade (6 cm Hinterlüftung, Naturstein)
- Geringer Fensterflächenanteil
- **Natürliche, aktive Klimatisierung** (Fensterlüftung)

Durch den reduzierten Fensterflächenanteil und die massive Bauweise können Temperaturschwankungen durch die verringerten solaren Einträge sowie die hohe thermische Speichermasse im Tagesverlauf gedämpft werden. Zudem wirkt der hygroskopisch aktive Kalkputzmörtel als Feuchtepuffer für das Raumklima. Zur natürlichen, aktiven Belüftung dienen schlitzartigen Fenster, welche durch deren Positionierung an beiden Längsseiten eine Querlüftung bewerkstelligt. Bei kalten Temperaturen im Winter temperiert eine Heizung die Flächen.

### 2.3.2. Schleswiger Modell – natürliche, passive Klimatisierung



Abbildung 5: Landesarchiv Schleswig-Holstein (Quelle: Padfield [13])

Der Neubau des Landesarchivs Schleswig-Holstein in Schleswig, welcher 1991 eingeweiht wurde, zählt als einer der Nachfolger des „Kölner Modells“. Hier wurden einige Ansätze übernommen, teilweise adaptiert und ergänzt [11]:

- Massive Bauweise (51 cm Vollziegel)
- Isolierschicht (18 cm Mineralwolle)
- Vorhangfassade (11,5 cm Ziegel)
- Ohne Fensteröffnungen
- Möglichst reduzierter Luftwechsel
- **Natürliche, passive Klimatisierung**

Durch die zusätzliche Isolierschicht, die vollständige Vermeidung von Fensteröffnungen sowie die Reduktion des Luftwechsels (z.B. durch Klimaschleusen) wird das Innenraumklima stark vom Außenklima entkoppelt. Somit wird beim „Schleswiger Modell“ von einer statischen bzw. natürlich, passiven Klimatisierung gesprochen [10]. Dies geht jedoch einher mit einer langen Bautrocknungsphase von zwei bis drei Wintern und einer Vorklimatisierung der Archivalien [11, S. 134].

### 2.3.3. Low Energy Storage

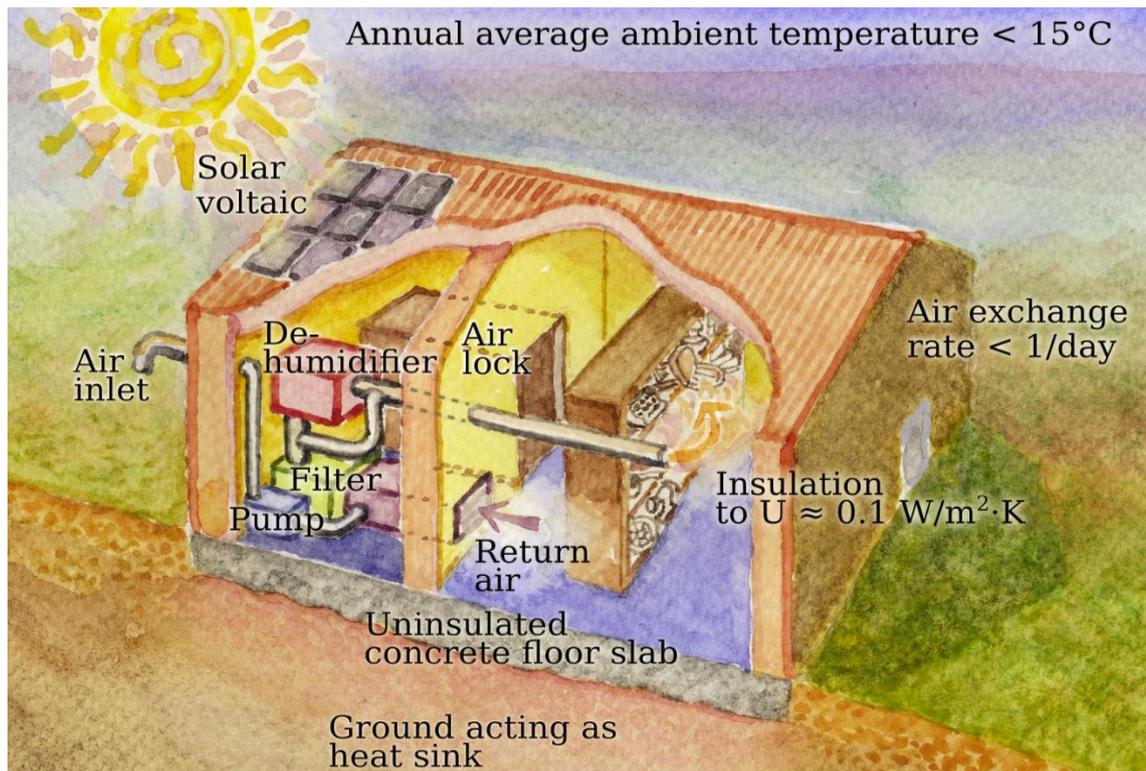


Abbildung 6: Low Energy Storage (Quelle: Padfield [14])

Ein weiterer Ansatz zur nachhaltigen Gebäudeplanung von Archiven und Depots wurde seit den 90er Jahren von Forschern rund um Tim Padfield und Poul Larsen entwickelt. Das sogenannte „Low Energy Storage“ basiert auch auf passiven Maßnahmen, zeichnet sich aber durch stärkeren Technologieeinsatz aus im Vergleich zu den vorherigen Konzepten [14]:

- Leichte, hoch wärmedämmende Bauweise
- Luftdichte Bauweise
- Kontrollierte Belüftung mit geringem Luftwechsel
- Ungedämmte Bodenplatte
- Entfeuchtung (Sommer); Heizen (Winter)

Durch die ungedämmte Bodenplatte nutzt das Gebäudekonzept die hohe thermische Speichermasse des Erdreichs unter dem Gebäude im Zusammenspiel mit der hoch wärmedämmten Gebäudehülle, um Temperaturschwankungen nahezu passiv zu kontrollieren. Um die relative Luftfeuchte zu steuern wird im Sommer eine Entfeuchtung der kontrollierten Belüftung und im Winter eine Erwärmung der Luft durchgeführt. Die Entfeuchtung kann im Sommer durch eigene Stromproduktion mittels Photovoltaik (PV) ressourceneffizient umgesetzt werden. [14]

## 2.4. Low-Tech-Ansätze

Aus den vorhergehenden Beispielen für umgesetzte Gebäudekonzepte und Feldforschung an bestehenden Gebäuden sowie im Fachdiskurs auf Konferenzen, können einige Low-Tech-Ansätze abgeleitet werden, die sich zum Teil schon in der Praxis bewähren konnten.

### 2.4.1. Geschlossene Gebäudehülle

Um das Innenraumklima möglichst stark vom Außenklima zu entkoppeln wird eine möglichst geschlossene und luftdichte Gebäudehülle angestrebt. Zum einen wurden die Fensterflächen sukzessive reduziert, um direkte solare Wärmeeinträge und negative Einflüsse durch verstärkte Wärmeleitung sowie konvektiven Wärme- und Feuchtetransport durch unkontrollierten, natürlichen Luftwechsel zu minimieren. Zudem stellen Öffnungen in der Gebäudehülle immer auch Schwachstellen der Wärmedämmung sowie potentielle Undichtigkeiten dar.

### 2.4.2. Infiltration

Neben der Vermeidung von Fensterflächen und einem natürlichen Luftwechsel, spielt insbesondere auch Infiltration über Luftundichtigkeiten beispielsweise durch Türen, RWA-Öffnungen oder die Lüftungsanlage eine große Rolle. Auch interne Infiltration zwischen Nutz- und Depotflächen kann beispielsweise durch Klimaschleusen und dicht schließende Türen vermieden werden, um so kurzzeitige Temperatur- und Feuchte-schwankungen durch einen erhöhten Luftwechsel zu vermeiden. Ein weiterer Aspekt hierbei sind Luftverschleppungen über Aufzüge, welche über mehrere Geschoße hinweg und über größere Druckdifferenzen häufig einen verstärkten Luftwechsel erzeugen. Dies ist über eine sinnvolle Positionierung der Aufzüge zu vermeiden, um die Luftverschleppung nicht direkt in Depotflächen einzubringen. Dass in Depotflächen mit geringerer Infiltration insbesondere die relative Luftfeuchte einfacher und effizienter kontrolliert werden kann, zeigt beispielsweise auch eine Studie von Christensen und Janssen [15].

### 2.4.3. Wärmedämmung

Um die Wärmeleitung durch die Gebäudehülle in beide Richtungen zu reduzieren und so Temperaturschwankungen zu minimieren, dienen hoch wärmegeämmte Außenwände. Insbesondere hohe Temperaturamplituden zwischen Tag und Nacht können dadurch geglättet werden und tragen zu einer konstanteren Innenraumtemperatur bei. Aber auch die thermische Entkoppelung unterschiedlicher Nutzungsbereiche innerhalb eines Depots kann durchaus nützlich sein. Werden beispielsweise baulich Aufenthaltsflächen oder Büroräume mit abweichenden Anforderungen an den thermischen Komfort,

sowie höheren internen Lasten direkt angrenzend an Depotflächen geplant, sollten die Trennwände auch hier hoch wärmedämmend ausgeführt werden.

#### 2.4.4. Thermische und hygrische Speichermasse

Einen weiteren Ansatz zur Stabilisierung des Innenraumklimas stellen Baumaterialien mit einer hohen thermischen sowie hygrischen Speicherfähigkeit dar. Durch eine schwere Bauweise mit hoher thermischer Speichermasse werden Temperaturamplituden nochmals geglättet. Ebenso verhält es sich bei kurzzeitigen Schwankungen der relativen Luftfeuchte. Werden hier Materialien mit einer hohen absoluten hygrischen Speichermasse und einem schnellen hygrischen Reaktionsvermögen eingesetzt, kann auch hier ein deutlich trägeres Verhalten erzielt werden.

#### 2.4.5. Ungedämmte Bodenplatte

Für die Nutzung der thermischen Speichermasse sind nicht nur die verwendeten Baumaterialien des Gebäudes an sich zu nennen, sondern wie das Beispiel des Low-Energy-Storage Konzeptes zeigt, kann auch das Erdreich unterhalb des Gebäudes als große thermische Speichermasse aktiviert werden. Indem die Bodenplatte ungedämmt ausgeführt wird, kann ein bidirektionaler Wärmeaustausch zwischen Gebäude und Erdreich ermöglicht werden. Dieser kann unter gewissen Randbedingungen zu einem Wärmefluss vom Erdreich in die Magazinräume im Winter bei kalten Außenbedingungen führen und eine Wärmeabfuhr in den Boden im Sommerfall ermöglichen. Dies haben Simulationen für ein Depot in Dänemark gezeigt, welches nach dem Low-Energy-Konzept umgesetzt wurde [14]. In Abbildung 7 wird die simulierte Erdreichtemperatur unter dem Depot in Ribe dargestellt für den Winter- und Sommerfall.

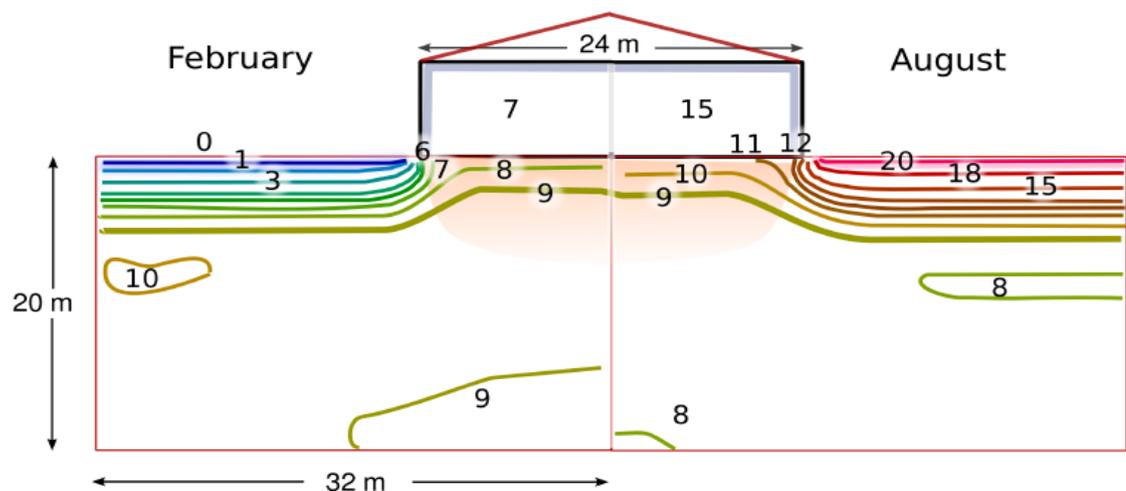


Abbildung 7: Simulation Erdreichtemperatur Depot Ribe [14]

### **2.4.6. Zonierung**

Wie schon unter 2.4.3 angedeutet, spielt auch die Zonierung eine große Rolle. So ist darauf zu achten, dass Magazinräume möglichst kompakt und zusammenhängend als eine thermische Zone im Gebäude geplant werden. Dies ist in Kombination mit möglicherweise nötiger innenliegenden Wärmedämmung zu angrenzenden Zonen mit abweichenden Anforderungen und thermischer Lasten zu sehen. Auch eine ungedämmte Bodenplatte wie zuvor beschrieben, kann in das Zonierungskonzept integriert werden.

### **2.4.7. Haus-in-Haus Prinzip**

Einige der zuvor genannten Aspekte können in einem Haus-in-Haus Prinzip kombiniert werden. Zum einen können mögliche Undichtigkeiten in der Gebäudehülle ausgeglichen werden durch deren Trennung von den Umschließungsflächen der Depotflächen und einer luftdichten Ausführung inklusive Klimaschleusen. Dementsprechend können dann in der Außenhülle des Gebäudes, wenn nötig, vereinzelt Öffnungen vorgesehen werden. Zudem wird durch den zweischaligen Aufbau weitere thermische und möglicherweise auch hygrische Speichermasse ins Gebäude eingebracht. Nicht zuletzt kann dadurch eine intelligente Zonierung ermöglicht werden.

## **2.5. Energiekonzepte**

Neben den passiven Low-Tech-Ansätzen spielt für ein ganzheitliches Gebäudekonzept das Energiekonzept eine zentrale Rolle. Die Technik wird zwar so weit möglich reduziert, jedoch muss sie dort wo nötig möglichst intelligent in das Konzept integriert werden.

### **2.5.1. Vollklimaanlage**

Die zuvor genannten Beispiele für Low-Tech-Ansätze versuchen gezielt hochtechnologische Lösungen wie eine Vollklimaanlage möglichst zu vermeiden. Bei einer solchen kann die Zuluft bei Bedarf sowohl geheizt, gekühlt, be- und entfeuchtet werden. Dadurch ist permanent eine Belüftung möglich und es kann ein Sollwert exakt auf Strich gefahren werden. Jedoch ist damit ein enormer Ressourcen- und Energiebedarf für Installation und Betrieb verbunden, welcher sich auch in hohen Betriebs- und Investitionskosten widerspiegelt. Zudem sind komplexe Anlagen immer besonders fehleranfällig. Dies wird in der Fachwelt auch als einer der Gründe für die sogenannte Performance Gap betrachtet, welche die Diskrepanz zwischen geplanter und tatsächlicher Energieeffizienz von Gebäuden beschreibt [16].

### **2.5.2. Passivlüftung**

Im Gegensatz zur Vollklimatisierung wird bei einer Passivlüftung die Zuluft nicht aktiv, sondern nur passiv über eine Wärmerückgewinnung vorkonditioniert. Dadurch sind

Energiebedarf und Technikaufwand deutlich reduziert, eine geringere Fehleranfälligkeit gegeben sowie die Betriebs- und Investitionskosten niedriger. Jedoch kann nur bei entsprechenden Außenklimaverhältnissen gelüftet werden, was bei hohen relativen Feuchten sowie in den ersten Betriebsjahren wegen der Baufeuchte problematisch sein kann.

### 2.5.3. Passivlüftung und Entfeuchtung

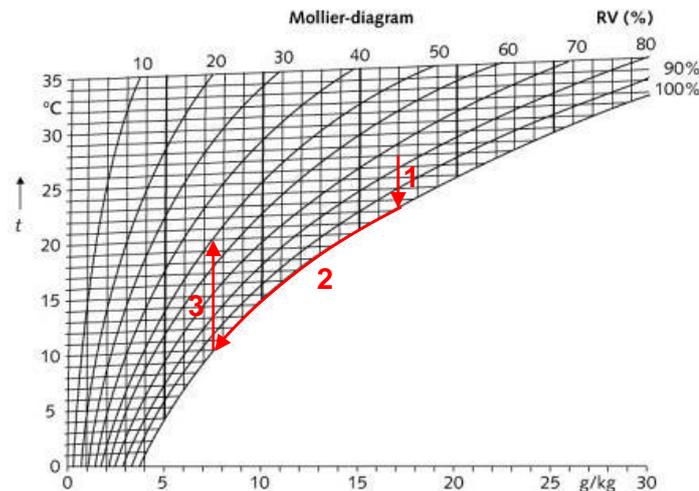


Abbildung 8: Mollier-Diagramm Luftentfeuchtung

Wird der passiven Lüftungsanlage eine Entfeuchtungseinheit hinzugefügt, wie es das Konzept des Low-Energy-Storage vorsieht, ist insbesondere auch bei hoher Außenfeuchte ein Lüftungsbetrieb möglich und es kann gezielt Baufeuchte abgeführt werden. Jedoch tritt bei einem gezielten bzw. geregelten

Entfeuchten insbesondere im Sommerfall häufig ein gleichzeitiger Wärme- und Kältebedarf auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Luft je nach Außenbedingungen, wie beispielhaft in Abbildung 8 dargestellt, zunächst zum Taupunkt (1) und darüber hinaus abgekühlt (2) und anschließend nacherwärmt (3) werden muss, um die gewünschten Bedingungen zu erreichen. Zudem sind diese Anlagen wiederum aufwendiger in der Planung, Installation und im Betrieb und es gibt durch den Tauwasserausfall häufig Hygieneprobleme.

### 2.5.4. „Conservation Heating“

Neben der Belüftung spielt das Heizkonzept ebenfalls eine wichtige Rolle. Die relative Luftfeuchte als Raumklimaparameter nimmt jedoch im Vergleich einen höheren Stellenwert ein, als die Lufttemperatur (vgl. 2.2.1). Zudem kann durch die oben genannten Low-Tech-Ansätze die Lufttemperatur passiv besser kontrolliert werden als die relative Luftfeuchte. Hinzu kommen viele Herausforderungen und Nachteile einer gezielten Entfeuchtung der Zuluft einer aktiven Belüftung (siehe 2.5.3). Daher hat sich der sogenannte Ansatz der „Conservation Heating“ entwickelt, bei welchem die relative Luftfeuchte über ein gezieltes Heizen versucht wird zu kontrollieren.

### 3. Low-Tech-Gebäudekonzept

Aus der Grundlagenanalyse und den vorgestellten Beispielen für existierende Gebäudekonzepte für Depots und Archive sowie der Analyse von Low-Tech-Ansätzen und Energiekonzepten, wurden einzelne Aspekte übernommen, angepasst und ergänzt. Dies baut zudem auf einer Masterarbeit auf, welche am Lehrstuhl durchgeführt wurde [7].

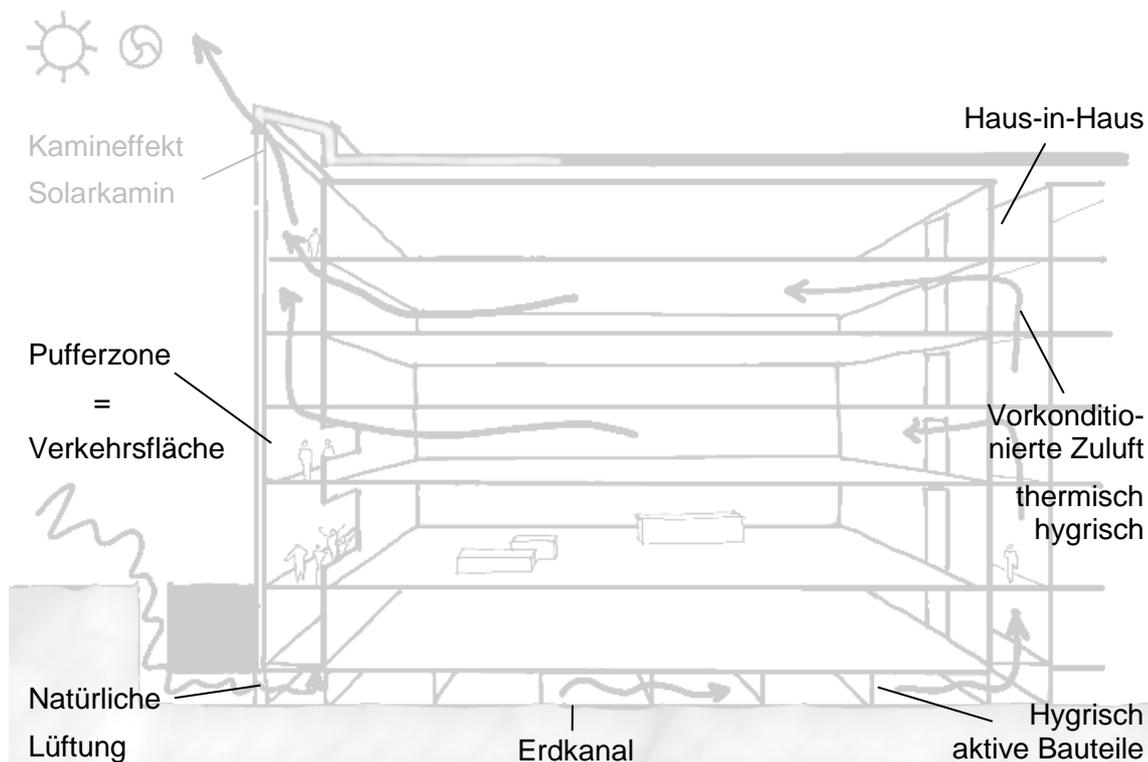


Abbildung 9: Low-Tech-Gebäudekonzept

Das Low-Tech-Gebäudekonzept wird in Abbildung 9 schematisch dargestellt. Die Möglichkeit, die natürliche Lüftung über einen Solarkamin anzutreiben, wurde nach ersten Überlegungen aus dem Konzept ausgeklammert, da ein sicherer Betrieb bei allen klimatischen Bedingungen ermöglicht werden muss. Die wichtigsten Aspekte darin sind:

- Haus-in-Haus Prinzip
- Natürliches Lüftungskonzept mit Erdkanal
- Passive thermische und hygrische Vorkonditionierung
- Luftführung über Pufferzone (= Verkehrsfläche)
- Dezentrale Lüftungs- und Heizungsregelung

### 3.1. Klimaanalyse

Um passive Maßnahmen sowie Low-Tech-Ansätze gezielt planen und effektiv einsetzen zu können, ist eine dezidierte Klimaanalyse am Standort zwingend nötig. Da hier für das Depot der Fokus auf die Lufttemperatur sowie die relative Luftfeuchte gelegt wird (vgl. 0), werden auch diese Werte für das Außenklima eingehend analysiert. Als Standort wird München angesetzt, da das Deutsche Museum auch hier eine mögliche Lokation für ein zentrales Depot sieht.

#### 3.1.1. Lufttemperatur

München ist ein typischer Vertreter des gemäßigten Klimas. Hier sind insbesondere starke Schwankungen der Temperatur über das Jahr kennzeichnend. Im Winter sinken die Temperaturen bis unter  $-15^{\circ}\text{C}$  ab, im Sommer erreichen sie Spitzenwerte von über  $30^{\circ}\text{C}$  (siehe Abbildung 10). In Abbildung 10 sind ebendiese Werte für Tagesmaximum und -minimum sowie der Mittelwert je Tag und je Monat angegeben. Hieran lässt sich ablesen, dass im Sommer trotz der hohen Tageswerte die Amplitude zwischen Tages- und Nachtwerten bis über 10K beträgt. Im Winter fällt diese Diskrepanz zwischen Tagesminimum und -Maximum etwas geringer aus und liegt etwa bei 5 K. Der Jahresmittelwert für die Außenlufttemperatur beträgt für den Standort München je nach Wetterdatensatz knapp  $8^{\circ}\text{C}$  (siehe 4.1.1).

Der Zielkorridor für das Innenraumklima ist in der Darstellung grau hinterlegt. Hierdurch kann eine erste Abschätzung abgeleitet werden, in welchen Zeiträumen theoretisch die Außenluft unkonditioniert die richtige Temperatur zur direkten, natürlichen Belüftung des Innenraums hat. Da auch die Jahresmitteltemperatur unterhalb des Klimakorridors liegt, kann davon ausgegangen werden, dass eine rein passive Klimastabilisierung nicht ausreichen wird, sondern aktiv eine gewisse Temperierung nötig sein wird.

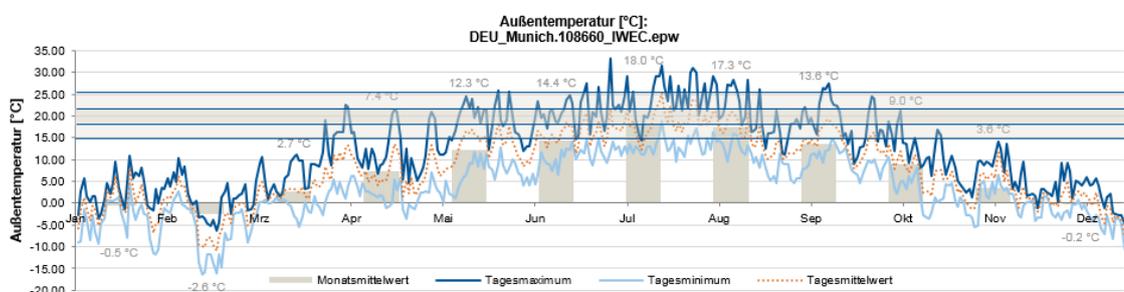


Abbildung 10: Außenlufttemperatur Standort München

### 3.1.2. Relative Außenluftfeuchte

Auch die relative Luftfeuchte am Standort München zeigt deutliche Schwankungen im Jahres- und Tagesverlauf. In Abbildung 11 werden die stündlichen Werte pro Tag vertikal und über das Jahr horizontal mittels farblicher Kodierung als Flächen dargestellt. Tagsüber sinken die Werte in den Monaten März bis Oktober häufig unter 50 % r.F. (orange bis rot) und erreichen vereinzelt Minimalwerte von bis zu 23 % r.F. (dunkelrot). Nachts und in den Monaten November bis Februar beträgt die Feuchte häufig mehr als 80 % r.F. (dunkelblau).

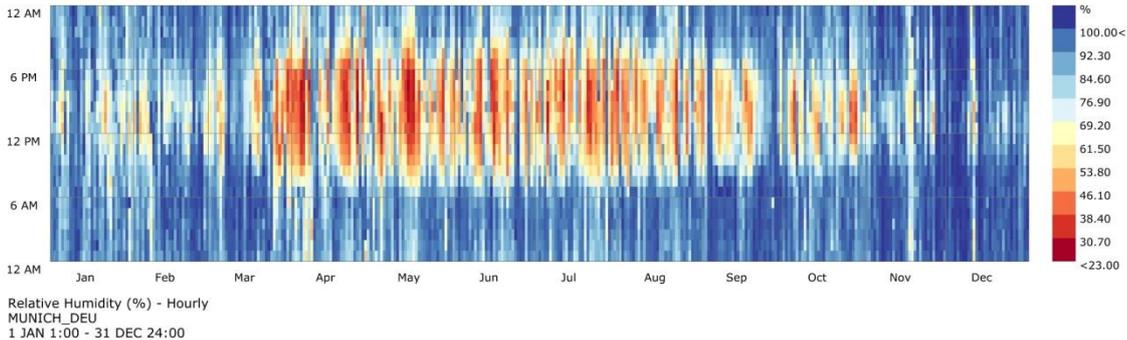


Abbildung 11: Relative Außenluftfeuchte im Jahres- und Tagesverlauf

Um den Tagesverlauf genauer untersuchen zu können, werden in Abbildung 12 die monatlich gemittelten stündlichen Feuchten für den Maximal-, Minimal- und Mittelwert dargestellt. Somit ist pro Spalte der Tagesverlauf von 0 – 24 Uhr über den Monat gemittelt als Graph dargestellt.

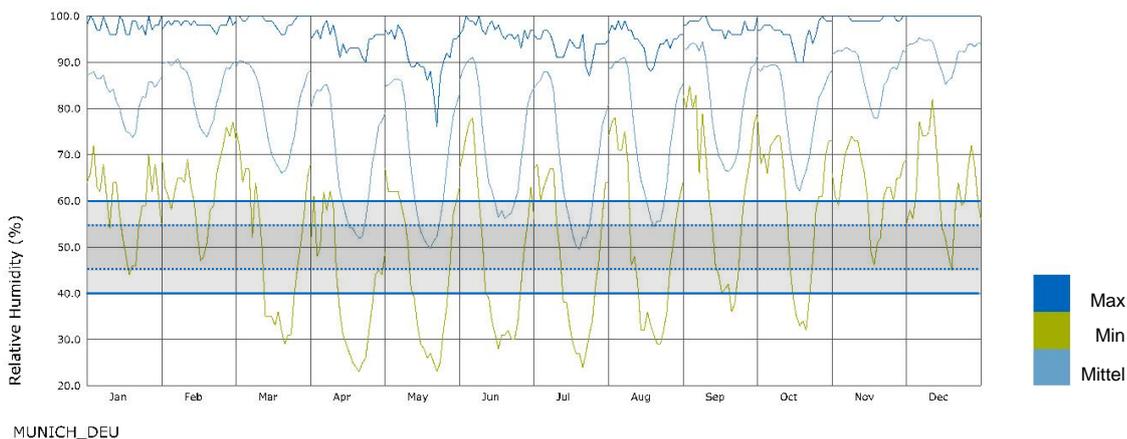


Abbildung 12: Relative Außenluftfeuchte als monatlich gemittelte Stundenwerte

Zusätzlich ist auch hier der Zielkorridor für das Raumklima in grau dargestellt. Somit lässt sich hier erkennen, dass trotz sehr hoher Luftfeuchte in den Wintermonaten, mittags vereinzelt die Werte innerhalb des gewünschten Bereichs liegen und somit direkt natürlich gelüftet werden könnte. Insbesondere in den Monaten April bis August liegen sogar

die Mittelwerte tagsüber im Klimakorridor, wodurch hier gezieltes Lüften ohne Konditionierung möglich ist. Der Jahresmittelwert für die relative Luftfeuchte beträgt etwa 78 % r.F. (siehe 4.1.1). Daraus lässt sich auch hier ableiten, dass voraussichtlich ein rein passiver Betrieb des Gebäudes, auch mit einer starken Glättung der Feuchtekurven, nicht die gewünschte Luftfeuchte im Innenraum erzielen wird. Daher muss auch hier aktiv die Luftfeuchte verändert werden.

### 3.1.3. Carrier-Diagramm

In einem sogenannten Carrier-Diagramm (engl.: Psychrometric Chart) wird der Zusammenhang von Lufttemperatur, relativer und absoluter Feuchte dargestellt. In Abbildung 13 wird in ein solches Diagramm mit der Lufttemperatur auf der horizontalen Achse, der absoluten Feuchte auf der vertikalen Achse und einer Kurvenschar für konstante relative Feuchte dargestellt. Die Außenklimawerte für München sind auch hier als Flächen mit einer farblichen Kodierung für die Zustandsdauer pro Jahr eingetragen. In Schwarz wurde der Zielkorridor für das Innenraumklima ergänzt. Mit roten gestrichelten Linien ist nun der Bereich angedeutet, in welchem durch eine reine Erwärmung der Außenluft (horizontale Zustandsveränderung nach rechts), die Zielwerte erreicht werden könnten. Dies kann als Potential für eine natürliche Lüftung inklusive „Conservation Heating“ gedeutet werden (vgl. 2.5.4).

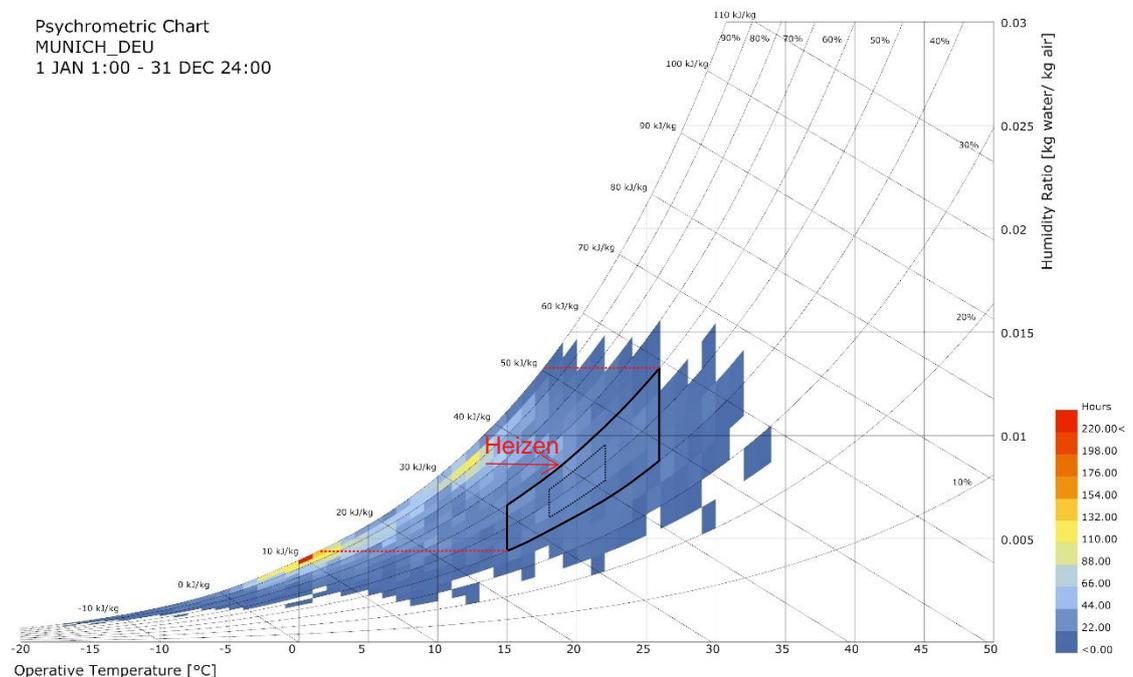


Abbildung 13: Carrier-Diagramm mit Zielkorridor

## 3.2. Modulares Haus-in-Haus Konzept

Im Rahmen der Voruntersuchungen in der Masterarbeit [7] wurde unter Berücksichtigung baurechtlicher Vorgaben, welche sich aus einem potentiellen Grundstück ergaben, sowie in Anbetracht angestrebter Ausbaustufen und Fertigstellungsszenarien ein vereinfachtes Gebäudekonzept entwickelt. Dieses kann als modulares Haus-in-Haus Konzept beschrieben werden. In einen 100 x 100 m Quader werden 9 einzelne Module mit einer Abmessung von 30 x 30 m eingesetzt (siehe Abbildung 14). Je nach Bedarf kann diese Anordnung variiert oder aber sukzessive in verschiedenen Ausbaustufen erweitert werden. Es handelt sich dabei um ein rein konzeptionelles Gebäudemodell zur Überprüfung des klimatischen und energetischen Verhaltens, das in der Planung an das tatsächliche Grundstück sowie das Raumprogramm angepasst werden müsste.

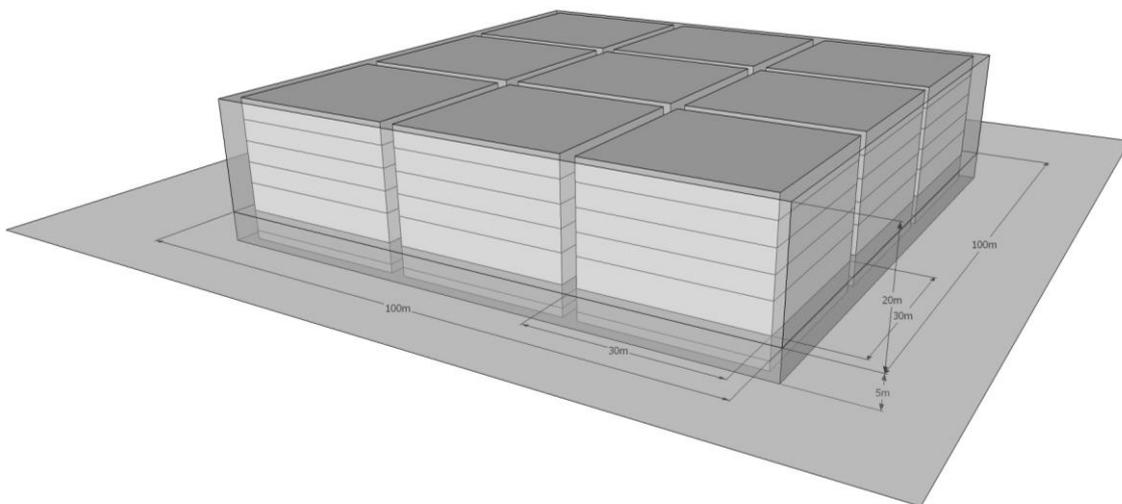


Abbildung 14: Modulares Haus-in-Haus Prinzip

In diesem Konzept können die Vorteile des Haus-in-Haus Prinzips zur passiven Klimastabilisierung genutzt werden (siehe 2.4.7). Die somit entstehenden Pufferzonen zwischen Depotflächen und Gebäudehülle könnten bei intelligenter Zonierung und Raumaufteilung auch als Verkehrsflächen dienen.

### 3.3. Natürliche Lüftung und Erdkanal

Aus der Grundlagenrecherche und der Klimaanalyse geht hervor, dass bei einem rein natürlichen bzw. passiven Lüftungskonzept die Außenklimabedingungen häufig nicht im gewünschten Zielkorridor liegen und somit die Außenluft nicht ohne Vorkonditionierung zum Belüften verwendet werden kann. Zudem würden ohne jegliche Veränderung der Zuluft die starken Schwankungen in Temperatur und Feuchte mit ins Depot eingebracht werden. Um jedoch die Konditionierung der Luft möglichst passiv zu unterstützen, wird ein natürliches Lüftungskonzept mit einem Erdkanal vorgeschlagen und überprüft.

Hierzu wird unterhalb des Untergeschoßes ein Erdkanal vorgesehen (siehe Abbildung 15). In diesen wird die Unbehandelte Außenluft eingebracht und über Kanäle an thermisch und hygrysch aktiven Bauteilen vorbeigeführt und so passiv vorkonditioniert. Zudem ist die Bodenplatte unterhalb des Erdkanals ungedämmt ausgeführt, was zusätzlich einen bidirektionalen Wärmeaustausch mit dem Erdreich ermöglicht und so eine sehr hohe zusätzliche thermische Speichermasse definiert.

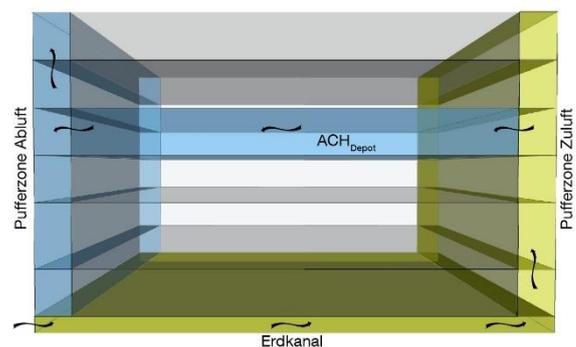


Abbildung 15: Luftführung Detail

Die Pufferzonen, welche aus dem Haus-in-Haus Prinzip resultieren und als Verkehrsflächen genutzt werden, dienen gleichzeitig auch zur Luftverteilung. Dadurch kann zum einen auf ein aufwendiges Kanalsystem verzichtet werden und somit Ressourcen sowie Investitionskosten eingespart werden. Zum anderen kann dadurch die thermische und hygrysche Speichermasse der Bauteile in den Pufferzonen zusätzlich aktiviert werden.

Die Pufferzonen werden so angeordnet und voneinander getrennt, dass für jedes Modul jeweils eine Zuluft sowie Abluft Pufferzone zur Verfügung steht (siehe Abbildung 16). Die

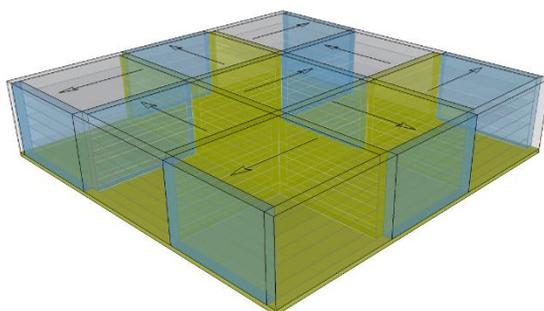


Abbildung 16: Gebäudedurchströmung

Zuluftzone wird aus dem Erdkanal gespeist und dient zur vertikalen Verteilung. Über eine dezentrale Regelung werden dann alle Depotflächen individuell mit vorkonditionierter Zuluft versorgt (siehe Abbildung 15). Diese durchströmt die Depotflächen und wird über die Abluftzone abgeführt.

### 3.4. Dezentrale Lüftung und Heizung

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Klimaaanalyse (vgl. 3.1.3) und wie bei den Low-Tech-Ansätzen angedeutet (vgl. 2.5.4), wird vorgeschlagen, die relative Luftfeuchte zusätzlich zur passiven Vorkonditionierung der Zuluft im Sinne des „Conservation Heating“ über eine zusätzliche aktive Erwärmung zu steuern. Da es hier nicht darum geht, Behaglichkeitsanforderungen einzuhalten, was beispielsweise für eine Flächenheizung sprechen könnte, sondern rein darum, die Luftparameter zu beeinflussen, soll auch direkt die Luft geheizt werden.

Hier soll gezielt auf ein zentrales System verzichtet werden, sondern jede Depotfläche über dezentrale Lüftungsgeräte mit einem kleinen Heizregister versorgt und individuell angesteuert werden. Dies hat den Vorteil, dass zum einen individuell auf jedes Raumklima in den einzelnen Räumen reagiert werden kann. Zum anderen kann so über ein intelligentes Sammlungsmanagement auf materialspezifische Abweichungen vom allgemeinen Klimakorridor eingegangen werden. Hinzu kommt, dass der Luftwechsel, aber auch die Lufttemperatur bei Benutzung durch Mitarbeiter spezifisch angepasst werden kann, um die Behaglichkeitskriterien zu optimieren.

## 4. Hygrothermische Gebäudesimulation

Um das vorgestellte Low-Tech-Gebäudekonzept auf dessen effiziente Funktionalität überprüfen und optimieren zu können, wird eine hygrothermische Gebäudesimulation herangezogen. Die Software-Familie WUFI® steht für **W**ärme **U**nd **F**euchte **I**nstationär und dient zur „realitätsnahen instationären Berechnung des gekoppelten ein- und zwei-dimensionalen Wärme- und Feuchtetransports in mehrschichtigen Bauteilen und Gebäuden“ [17].

Das verwendete Programm WUFI® Plus koppelt die instationäre Berechnung von hygrothermischen Bedingungen im Bauteil mit der Simulation des Raumklimas [18]. Somit können detailliert die Low-Tech-Ansätze und deren Einflüsse auf das Raumklima, insbesondere im Hinblick auf das hygrothermische Verhalten überprüft und optimiert werden.

### 4.1. Simulationsparameter

Bei jeglichen numerischen Simulationsmethoden ist einer der wichtigsten Aspekte, welche Annahmen für die Simulationsparameter getroffen werden. Ohne sorgfältige Auswahl und häufig iterative Annäherung, können keine aussagekräftigen Ergebnisse erzeugt werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Rahmenparameter und Annahmen erläutert.

#### 4.1.1. Wetterdaten

Das Raumklima hängt durch den Wärme- und Feuchteaustausch aber insbesondere auch durch Infiltration sowie natürliche Lüftung immer stark vom Außenklima ab. Daher muss ein besonderes Augenmerk auf die verwendeten Wetterdaten gelegt werden. Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Wetterdatensätzen. Für instationäre energetische Gebäudesimulationen hat sich das Testreferenzjahr etabliert. Im speziellen für das hygrothermische Verhalten sind jedoch zusätzlich zu den klassischen Außenklimadaten detaillierte Informationen zum Schlagregen nötig, um den Feuchtetransport der Gebäudehülle besser abbilden zu können.

Für diese Studie wird für den Standort München das sogenannte Feuchtereferenzjahr verwendet. Dieses basiert auf dem Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes. Aus den Regen- und Winddaten, wird dann der Schlagregen abgeleitet. Dies stellt eine vereinfachte Darstellung, aber auf der sicheren Seite dar (Quelle: WUFI® Plus). Im Vergleich zu anderen Wetterdaten mit detaillierteren Schlagregendaten, die jedoch nicht für den

Standort München verfügbar sind, wird somit eine bessere Abbildung der realen Situation erwartet. Zudem in der vorliegenden Studie nicht der Fokus auf dem Feuchteverhalten in der Gebäudehülle liegt, sondern in der Überprüfung der Low-Tech-Ansätze und insbesondere des natürlichen Lüftungskonzeptes und des hygrothermischen Verhaltens im Innenraum.

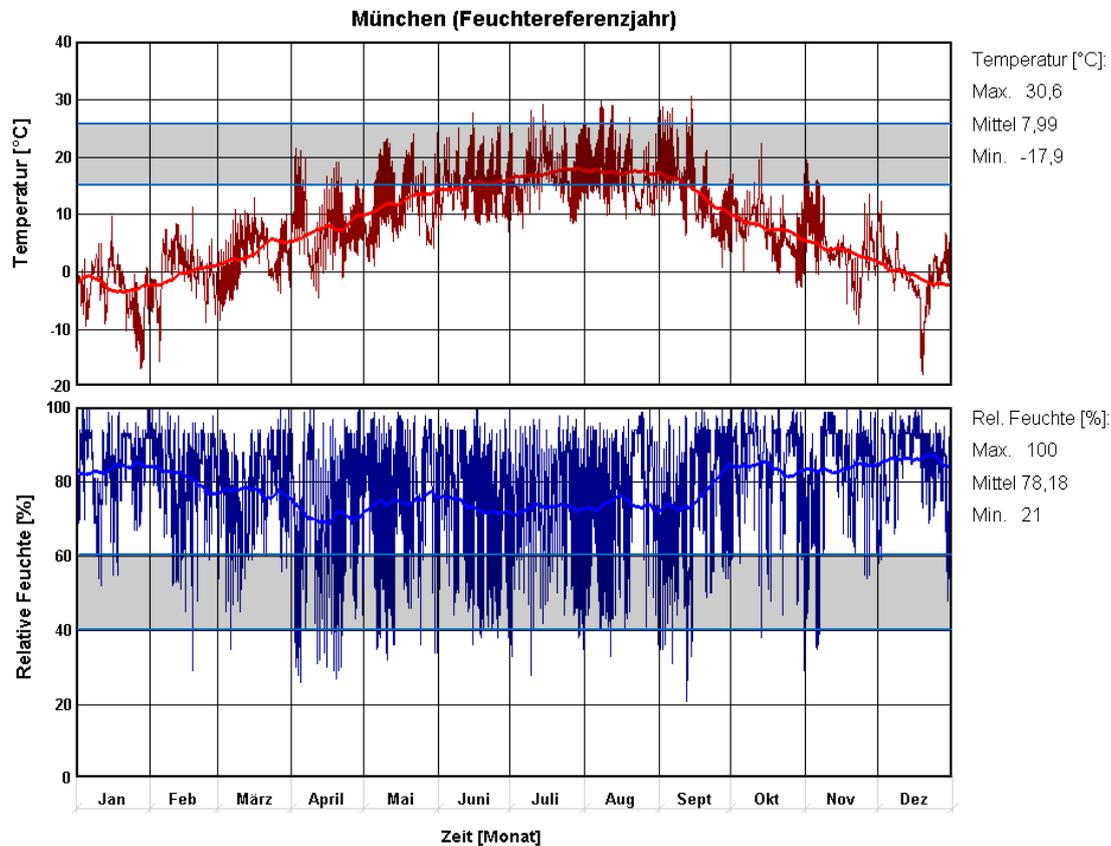


Abbildung 17: Temperatur und relative Luftfeuchte Feuchtereferenzjahr München (Quelle: WUFI® Plus)

In Abbildung 17 sind Jahresverläufe für Außenlufttemperatur sowie relative Luftfeuchte dargestellt. Die Werte sind nahezu identisch zur Klimaanalyse (siehe 0), daher wird hier nicht mehr explizit darauf eingegangen. Zusätzlich wurde auch hier der Zielkorridor für das Innenraumklima in grau hinterlegt. Ergänzend ist hier der Jahresmittelwert mit angegeben, welcher für die Lufttemperatur knapp 8°C und für die relative Luftfeuchte 78 % r.F. beträgt.

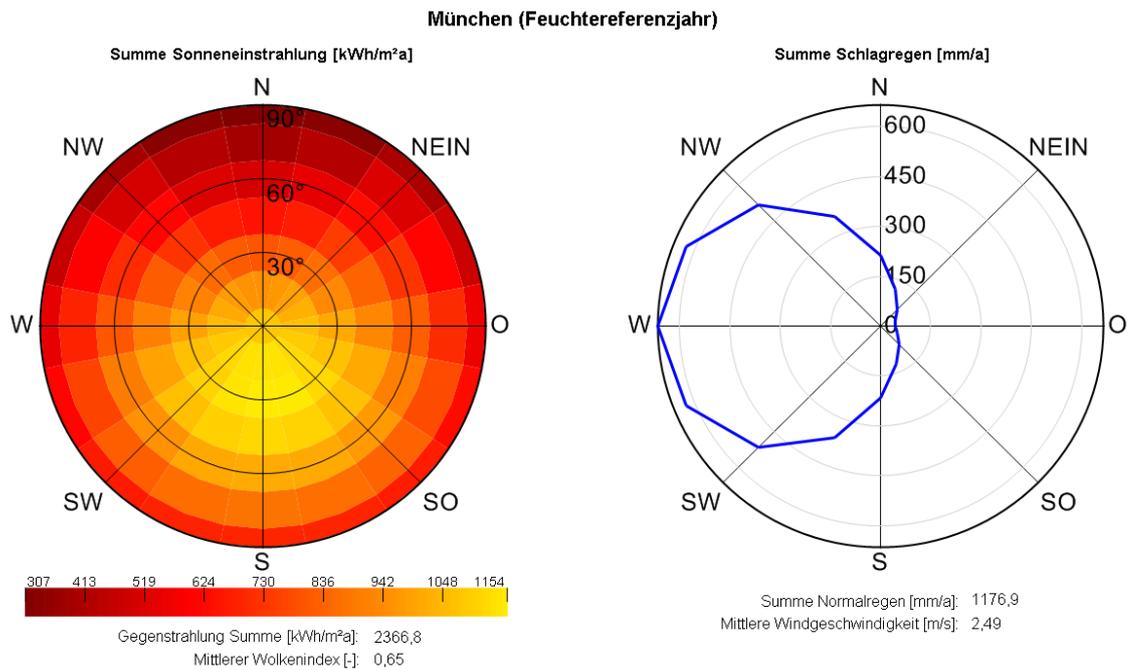


Abbildung 18: Sonneneinstrahlung und Schlagregen Feuchtereferenzjahr München (Quelle: WUFI® Plus)

Wenn auch für die Betrachtungen im Rahmen dieser Studie die solare Einstrahlung nicht im Vordergrund steht, da für die konzeptionelle Betrachtung auf Fensteröffnungen verzichtet wird, haben die Wärmeeinträge durch Sonneneinstrahlung einen Effekt auf das thermische Verhalten. In Abbildung 18 werden die jährlichen solaren Gewinne pro Fläche je nach Orientierung und Neigung dargestellt. Zudem ist die Schlagregenmenge aufgetragen nach Himmelsrichtung, woran sich auch die in München dominierende Windrichtung aus Westen ablesen lässt.

#### 4.1.2. Bodentemperatur

Da der Wärmeaustausch des unterirdischen Geschoßes sowie der ungedämmten Bodenplatte mit dem Erdreich ebenfalls mit abgebildet werden soll, ist eine Annahme für die Bodentemperatur zu treffen. Dazu gibt es eine Methode zur Berechnung der Verteilung der Bodentemperatur in Abhängigkeit der Jahresmitteltemperatur und die Temperaturamplitude der Außenluft sowie der Bodenart [19, S. 8]. Auf dieser Berechnungsgrundlage wurde für den Standort München mit der Annahme eines grobkiesigen Erdreichs der Temperaturverlauf über das Jahr berechnet und in Abbildung 19 dargestellt. Auf der horizontalen Achse ist dabei die Temperatur aufgetragen, die vertikale Achse stellt die Bodentiefe dar. Jede Kurve stellt die Temperaturverteilung über die Tiefe für einen Monat gemittelt dar.

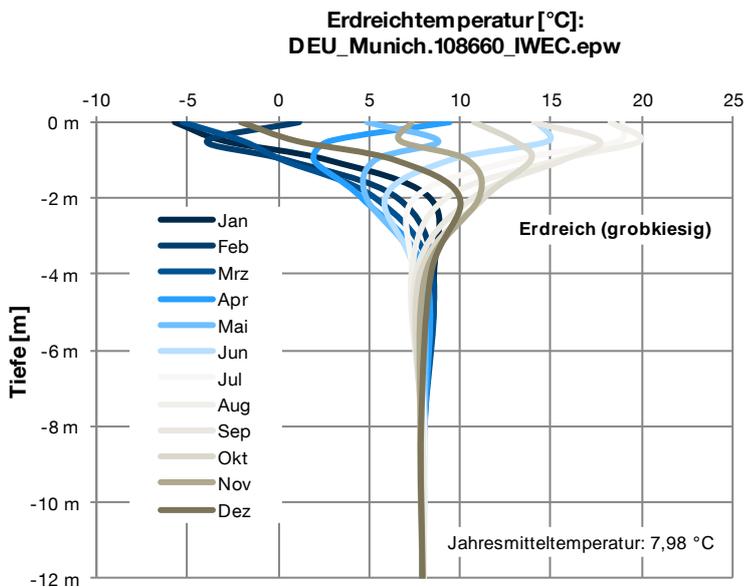


Abbildung 19: Verteilung Bodentemperatur im Jahresverlauf

Die somit ermittelte Bodentemperatur kann in WUFI® Plus über ein sogenanntes optionales Klima eingegeben werden. Hierfür wird vereinfachend die Temperatur in einer Tiefe von 4 m unterhalb der Oberfläche, was in etwa der Lage des Erdkanals entspricht, als Sinuskurve angenommen.

Der Jahresmittelwert der Außenlufttemperatur, welche der ungestörten Bodentemperatur ab etwa 9 m Tiefe entspricht, wird aus dem verwendeten Klimadatensatz mit 8°C übernommen. Die Temperaturamplitude in 4 m Tiefe wurde mittels der zuvor beschriebenen Methode berechnet und beträgt etwa 0,6 K. Durch den verzögerten Wärmetransport sind die Temperaturmaxima und –Minima im Vergleich zur Außenluft je nach Tiefe um bis zu einem halben Jahr verschoben. In der untersuchten Tiefe von 4 m wird die wärmste Bodentemperatur im Januar erreicht.

Somit ergibt sich angenähert eine Sinuskurve mit Mittelwert 8°C, einer Amplitude von 0,6 K sowie einem Maximum am 15. Januar (siehe Abbildung 20). Für die relative Feuchte kann für das Erdreich konstant 99 % angenommen werden.

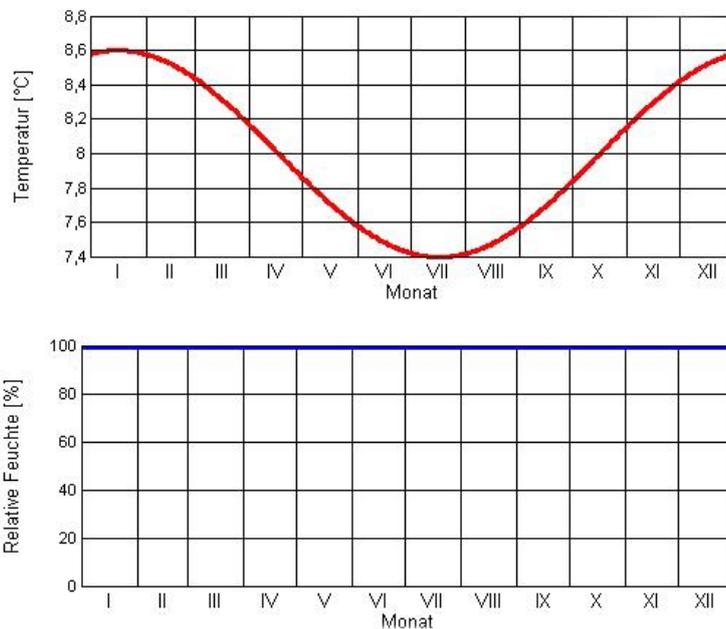


Abbildung 20: Optionales Klima für Bodentemperatur (Quelle: WUFI® Plus)

#### 4.1.3. Simulationszeitraum und Zeitschritt

Die hygrothermische Gebäudesimulation wird in diesem Fall für ein gesamtes Jahr durchgeführt, um die Funktionsweise der Low-Tech-Konzepte in allen möglichen Temperatur- und Feuchteverhältnissen zu testen. Der Simulationsschritt wird auf eine Stunde



noch Zone 1, 11, 12 und 13 simuliert werden. Alle weiteren Zonen werden nicht aktiv mitsimuliert, sondern deren Raumklima über die Eingabe eines vorgegebenen, optionalen Raumklima mit abgebildet, um den Wärme- und Feuchteaustausch zwischen den Zonen nicht zu vernachlässigen. Dieses leitet sich aus den vorhergehenden Simulationsergebnissen ab.

Dies erspart Rechenleistung und ermöglicht schnellere und dadurch mehr Simulationsvarianten. Zudem kann dadurch der Simulationszeitraum auf zwei Jahre erhöht werden, was eine bessere Abschätzung des Langzeitverhaltens ermöglicht.

#### **4.2.3. Wandaufbauten und Materialkennwerte**

Im Rahmen dieser Studie wird eine massive Bauweise aus Stahlbeton für die Außen- sowie Innenwände angenommen. Für den Erdkanal werden verschiedene hygrysch aktive Materialien untersucht, um die hygrysche Speichermasse zu erhöhen. In der nachfolgenden Tabelle sind die Wandaufbauten sowie die zugehörigen Materialkennwerte aufgezeigt. Die Kennwerte stammen aus der WUFI® Datenbank, um korrekte Annahmen für das hygrysche Verhalten sicherzustellen.

Tabelle 3: Wandaufbauten und Materialkennwerte

Bauteil	Material	Schichtdicke	Dichte	Wärmespeicherkapazität	Lambda	U-Wert
		[m]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[c]	[W/mK]	[W/(m <sup>2</sup> K)]
<b>1_Museumsdepot Außenwand Stb</b>	EPS	0.2	15	1500	0.04	0.19
	Beton C35/45	0.2	2220	850	1.6	
<b>1_Museumsdepot Bodenplatte</b>	Beton C35/45	0.2	2220	850	1.6	3.77
<b>1_Museumsdepot Decke</b>	Beton C35/45	0.2	2220	850	1.6	3.77
<b>1_Museumsdepot Flachdach</b>	Bitumen	0.005	1100	1500	0.17	0.23
	EPS	0.16	30	1500	0.04	
	PVC-Dachbahn	0.001	1000	1500	0.16	
	Beton C35/45	0.2	2220	850	1.6	
<b>1_Museumsdepot Innenwand</b>	Beton C35/45	0.2	2220	850	1.6	3.77
<b>1_Museumsdepot Kalksandstein</b>	Kalksandstein	0.2	1900	850	1	2.94
<b>1_Museumsdepot Porenbeton</b>	Porenbeton	0.3	500	850	0.12	0.38
<b>1_Museumsdepot Stb mit Lehmputz</b>	Lehmputz	0.025	1514	1000	0.59	3.14
	Beton C35/45	0.15	2220	850	1.6	
	Lehmputz	0.025	1514	1000	0.59	

Für die Anfangsfeuchte der einzelnen Bauteile wurde die typische Bauteilfeuchte bei 80 % r.F. angenommen, was einem lufttrockenen Zustand entspricht. Somit sind die Einflüsse einer erhöhten Baufeuchte hier nicht mit abgebildet.

#### 4.2.4. Materialien Exponate

Nicht nur die Baumaterialien, sondern auch die Exponate selbst stehen permanent im hydrothermischen Austausch mit der Umgebungsluft. Daher ist für eine Raumklimasimulation unabdinglich, auch diese in der Software mit abzubilden. Dazu wurde im Austausch mit dem Deutschen Museum versucht, eine Abschätzung zur Materialität der Exponate sowie zur Lagerungsart zu treffen. Zusätzlich wurden folgende Annahmen für die Raumnutzung getroffen:

- Grundfläche: 900 m<sup>2</sup>
- Genutzte Raumhöhe: 3 m
- Ausnutzung Fläche: 70 %
- Ausnutzung Volumen: 50 %

Um auch die Materialien der Lagerungsart abzudecken, wird für Holzpaletten vereinfacht eine Schichtdicke von 10 cm angenommen, bei den Regalen (Metall) und der Metallständerung jeweils 5 cm. Diese Annahmen sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Hier sind anteilig die Lagerungsart sowie die Materialität der Exponate, die davon in Anspruch genommene Fläche sowie das abgeschätzte Volumen aufgeführt.

Tabelle 4: Annahmen Lagerung und Material Exponate

	Anteil [%]	Fläche [m <sup>2</sup> ]	Volumen [m <sup>3</sup> ]
<b>Lagerung</b>			
Paletten	75 %	473	47
Regale	20 %	126	57
Metallständerung	5 %	32	5
<b>Material</b>			
Metall	50 %	315	473
Holz	30 %	189	284
Kunststoff	15 %	95	142
Glas und Keramik	5 %	32	47

## 4.3. Simulationsvarianten und Ergebnisse

Im Folgenden werden die wichtigsten Simulationsvarianten, welche iterativ weiterentwickelt und durchgeführt wurden, beschrieben sowie die Ergebnisse dargestellt und analysiert. Diese dargestellten Varianten bilden folgende Aspekte ab:

- Variante 1: Materialität Exponate
- Variante 2: Infiltrationsluftwechsel
- Variante 3: Luftwechselrate
- Variante 4: Puffermaterial Erdkanal
- Variante 5: Nutzungsszenarien
- Variante 6: Heizen
- Variante 7: optimierte Heizung und Entfeuchtung

Alle Simulationsvarianten wurden mit dem Simulationsmodell sowie den Rahmenparametern wie zuvor beschrieben (siehe Kapitel 4.2) durchgeführt, sofern nicht anders angegeben.

### 4.3.1. Variante 1: Materialität Exponate

Zunächst wird das rein passive, hygrothermische Verhalten der Depotflächen mit und ohne Exponate simuliert. Die Annahmen für die Materialität der Exponate sowie deren Lagerung sind unter 4.2.4 erläutert.

Die Ergebnisse der Simulation sind exemplarisch für eine Depotfläche (Zone 15) dargestellt. Dabei wird in Abbildung 22 der gesamte Jahresverlauf (8760 Stunden) für die simulierte Raumlufttemperatur und die relative Feuchte dargestellt. In blau ist jeweils der Zielkorridor und als graue Kurve die Außenklimawerte angedeutet.

Der grüne Graph stellt in dieser Variante das Verhalten eines leeren Raumes dar, ohne jegliche Exponate. Das gefüllte Depot verhält sich dazu im Vergleich (blauer Graph) stark verändert. Der Verlauf der Raumlufttemperatur ist glatter, die Amplitude verringert und das Maximum verschiebt sich um etwa einen Monat. Hier zeigt sich, dass die passiven Maßnahmen des Gebäudekonzepts schon ein Gleitklima ermöglichen, welches ohne Konditionierung sinusförmig um 10°C mit einer Amplitude von knapp 5 K schwingt.

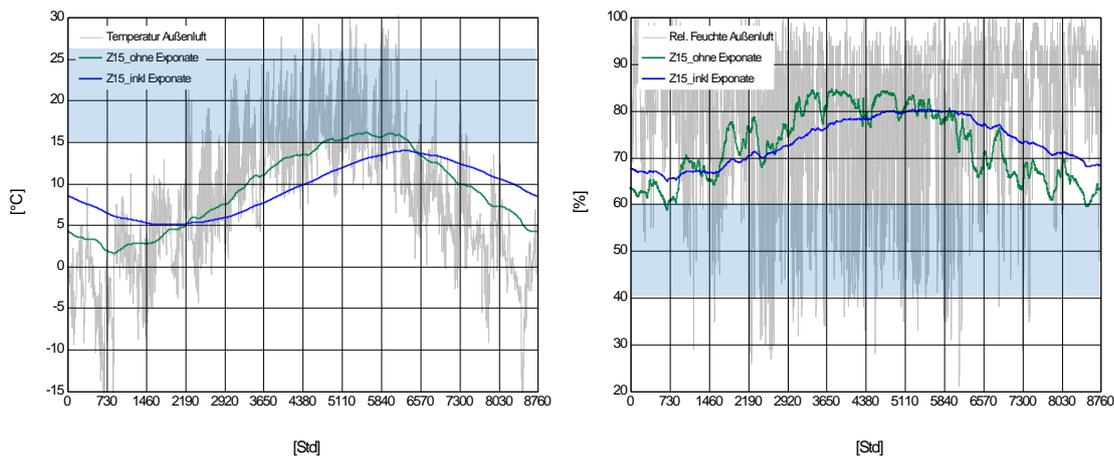


Abbildung 22: Simulationsergebnisse Variante 1 – Exponate

Die Glättung der Raumklimakurven sind bei der Raumluftfeuchte noch deutlicher zu erkennen. Hier waren im leeren Betrieb noch deutliche Schwankungen und Feuchtesprünge zu erkennen. Inklusive der Exponate gleitet auch hier das Raumklima schon recht gleichmäßig jahreszeitlich mit geringen kurzfristigen Schwankungen im Bereich zwischen 65 – 80 % r.F.

Somit zeigen diese Ergebnisse zum einen eindrücklich, wie stark der Einfluss der Exponate auf das thermische und insbesondere auf das hygrische Verhalten im Raum ist. Dies hängt natürlich direkt von der Zusammensetzung der Sammlung ab und muss daher für eine Planung und Auslegung eines Depots möglichst genau im Voraus bestimmt und in die Konzeptionierung integriert werden.

Zum anderen lässt sich erkennen, dass die passiven Maßnahmen ihre erwünschte Wirkung erzielen und ein Gleitklima ermöglichen. Jedoch kann bei einem rein passiven Betrieb der Klimakorridor weder für die Lufttemperatur noch für die Luftfeuchte eingehalten werden.

#### 4.3.2. Variante 2: Infiltrationsluftwechsel

Im nächsten Schritt wird der Einfluss der Infiltration, also des unkontrollierten Luftwechsels der Depotflächen untersucht. Durch das Gebäudekonzept selbst werden Leckagen möglichst vermieden (vgl. 2.4.2). So werden die Öffnungen in der Gebäudehülle, immer potentielle undichte Stellen, auf ein absolutes Minimum reduziert. Zudem dient die Pufferzone als zusätzliche Barriere, um die Infiltration in die Depotflächen selbst nochmals zu verringern.

Da es sich um einen Neubau mit besonderen Anforderungen handelt, wird in der Grundvariante eine geringe Infiltrationsluftwechselrate von 0,05 1/h (entspricht einem vollständigen Luftaustausch alle 20 Stunden) angenommen. Dieser Wert ist angelehnt an den

n50-Zielwert für den Passivhausstandard von 0,6 1/h [20]. Dieser Wert bezieht sich auf einen Referenzdruck von 50 Pa und kann vereinfachend umgerechnet werden auf eine wirksame Infiltrationsluftwechselrate von knapp 0,05 1/h [vgl. 21]. Dies wird als Annahme für die Infiltration durch die Gebäudehülle und zunächst auch für die Depotflächen getroffen. Im Vergleich dazu wird der Wert für die Infiltration von Pufferzone in die Depotflächen nochmals reduziert auf 0,01 1/h, um zu untersuchen wie zusätzlich Maßnahmen, wie beispielsweise Türen der höchsten Durchlässigkeitsklasse 4 nach EN 12207, sich auswirken können.

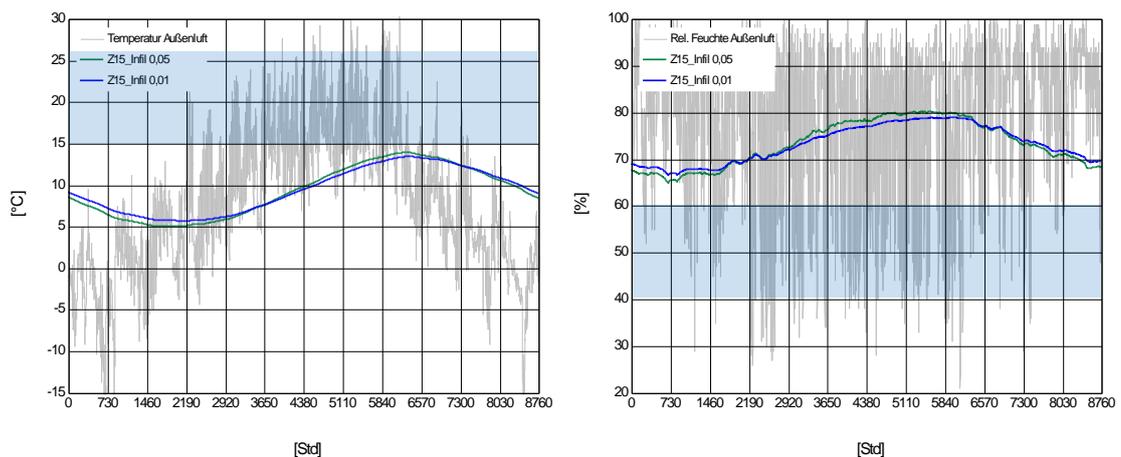


Abbildung 23: Simulationsergebnisse Variante 2 – Infiltrationsluftwechsel

Man erkennt in Abbildung 23 bei den simulierten Werten für Raumlufttemperatur sowie relativer Feuchte nur noch geringe Abweichungen zwischen einer Infiltration von 0,05 1/h (grün) und 0,01 1/h (blau). Der Verlauf ist nahezu identisch mit einer etwas verringerten Amplitude sowohl der Temperatur als auch der Luftfeuchte.

### 4.3.3. Variante 3: Luftwechselrate

Der kontrollierte Luftwechsel wurde im Simulationsmodell so ausgelegt, dass eine feste Luftwechselrate für die Lagerflächen angesetzt wird. Davon abhängig wird die notwendige Durchströmung der Pufferzonen sowie des Erdkanals abgeleitet. Der Wert für die Lagerflächen wurde vom Deutschen Museum auf 0,1 1/h vorgegeben. In Variante 3 wird untersucht, wie sich eine verringerte Belüftung mit 0,04 1/h auf das Raumklima auswirkt. Hier müssen natürlich bei der Planung und Auslegung immer auch die hier nicht behandelten Aspekte der Luftqualität und Abfuhr von Schadstoffen mit einbezogen werden.

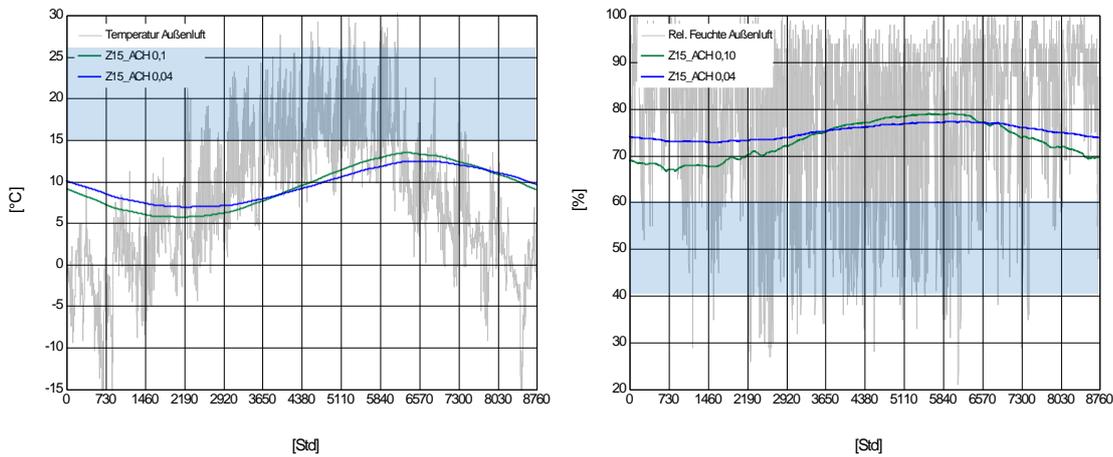


Abbildung 24: Simulationsergebnisse Variante 3 – Luftwechselrate

Der reduzierte Luftwechsel wirkt sich ähnlich wie in Variante 2 auf das Raumklima aus. Jedoch sind hier die Effekte stärker ersichtlich, da dadurch der gesamte Luftwechsel im Raum (Infiltration + Lüftung) nur noch 0,05 1/h beträgt.

#### 4.3.4. Variante 4: Puffermaterial Erdkanal

Ein weiterer zentraler Aspekt des Low-Tech-Gebäudekonzepts ist die passive, hygrothermische Vorkonditionierung der Außenluft im Erdkanal. Durch zusätzliches Einbringen von Materialien zur hygrischen und thermischen Pufferung, kann der Effekt des Erdkanals noch weiter optimiert werden. Dazu ist vorgesehen, nichttragende Trennwände im Erdkanal einzubringen, an welchen die Zuluft vorbeiströmt und so passiv vorkonditioniert wird. Durch die Aufteilung in mehrere Trennwände (siehe Abbildung 25) wird die hygrisch aktive Oberfläche stark vergrößert und dadurch der Puffereffekt verstärkt. Die dafür getesteten Materialien wurden aufgrund ihrer hygrothermischen Eigenschaften sowie bautechnischen Umsetzbarkeit ausgewählt:

- Kalksandstein
- Porenbeton
- Stahlbeton mit Lehmputz
- Stampflehm

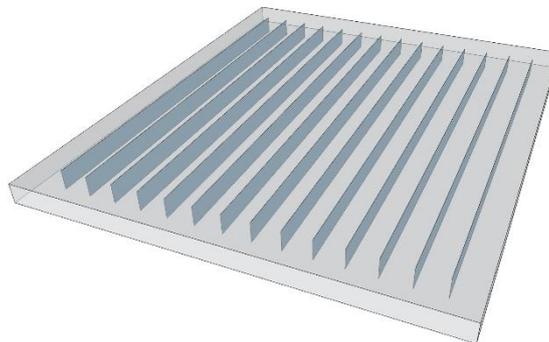


Abbildung 25: Zusätzliches Puffermaterial Erdkanal

In Abbildung 26 wird die simulierte relative Luftfeuchte im Erdkanal ohne zusätzliches Puffermaterial (grün) mit Porenbeton (blau) und einer Variante mit Lehmputz (orange) dargestellt. Die Kurven unterscheiden sich wesentlich zu denjenigen in den vorherigen Varianten, da hier das Raumklima im Erdkanal dargestellt wird, wo zum einen die Vorkonditionierung stattfindet und zum anderen der Luftwechsel deutlich

höher ist. Aber es lässt sich auch hier schon im Jahresverlauf erkennen, dass die Feuchtepufferung sowohl beim dargestellten Porenbeton, als auch bei der Lehmvariante wirksam ist.

Dies zeigt sich daran, dass die Amplitude der relativen Luftfeuchte im Erdkanal reduziert wird. Im Winter liegt sie um bis zu

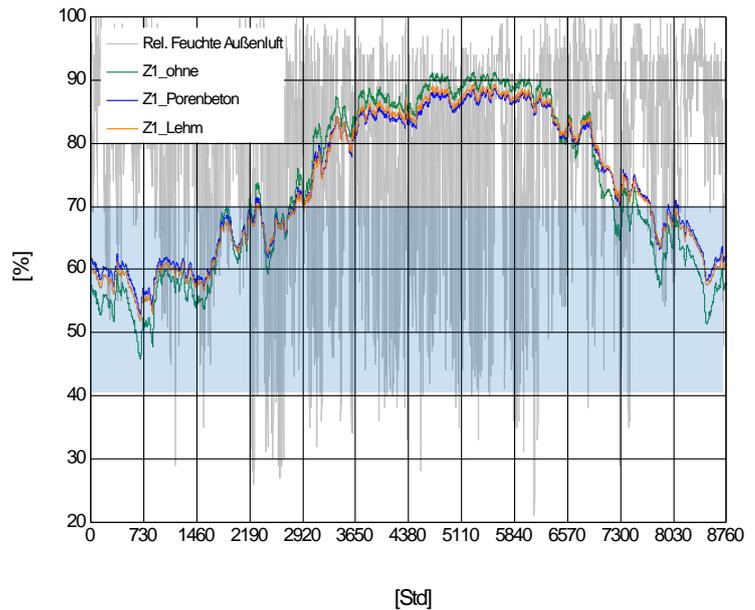


Abbildung 26: Simulationsergebnisse Variante 4 – Puffermaterial Erdkanal

5 Prozentpunkte über, im Sommer um einige Prozentpunkte unter der Variante ohne zusätzliches Puffermaterial (siehe Abbildung 26).

Um die Vorgänge genauer analysieren zu können, sind in Abbildung 27 exemplarisch zwei Zeitabschnitte mit jeweils 14 Tagen (09.-22.12. und 15.-28.04.) detailliert dargestellt. Hier ist das Feuchteverhalten ohne zusätzliches Puffermaterial (grün) mit Kalksandstein (blau) und mit Stampflehmwänden (orange) dargestellt.

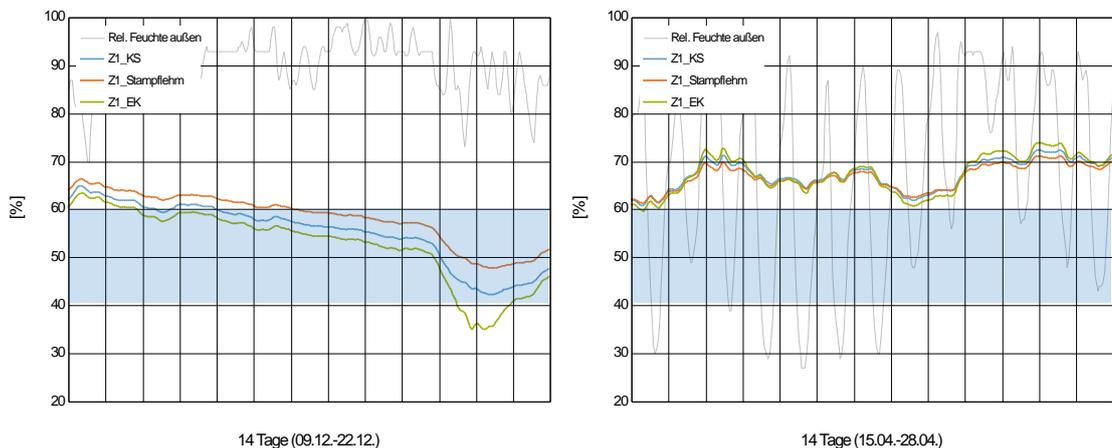


Abbildung 27: Simulationsergebnisse Detail Variante 4 – Puffermaterial Erdkanal

In Abbildung 27 zeigt sich, dass bei der Variante mit Stampflehm die relative Feuchte durchgehend über den beiden übrigen Fällen liegt. Jedoch wird das Absinken des Wertes der grünen Kurve von knapp 65 % r.F. auf fast 35 % r.F. innerhalb von 11 Tagen deutlich gedämpft auf nur etwas unter 50 % r.F.

Vergleicht man die simulierten Werte und deren Verlauf mit der relativen Außenluftfeuchte, kann nicht immer ein direkter Zusammenhang festgestellt werden. Dies liegt an der Abhängigkeit von relativer Luftfeuchte, absoluter Luftfeuchte und Lufttemperatur.

Im zweiten Zeitraum im April (siehe Abbildung 27) zeigt sich ein anderes Verhalten. Hier schwankt die relative Außenluftfeuchte zwischen Tag und Nacht deutlich stärker von 30 % r.F. bis 90 % r.F., was auf die Temperaturamplitude zurückzuführen ist. Es lässt sich im Erdkanal mit dem hygrisch hoch aktiven Stampflehm die Tendenz erkennen, dass auch hier im kleinen Maßstab die Schwankungen gedämpft werden. In diesem Fall liegen die Maximalwerte um bis zu 5 Prozentpunkte unter der Variante ohne Puffermaterial und die Minimalwerte knapp darüber.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die hygrothermische Pufferung im Erdkanal durch zusätzliche Speichermasse wirksam ist und sogar saisonal Schwankungen glätten kann. Für einen optimierten und effizienten Betrieb wären hierbei noch Anpassungen denkbar, sodass zum einen der Volumenstrom variabel je nach Feuchteverhältnissen innen und außen adaptiv geregelt werden könnte und so der Pufferspeicher gezielt be- und entladen werden kann. Zusätzlich wäre auch eine Bypassfunktion bzw. ein Umluftbetrieb denkbar, um Perioden zu überbrücken, in welchen die Außenbedingungen nicht den erwünschten Effekt im Erdkanal erzielen würden.

#### **4.3.5. Variante 5: Nutzungsszenarien**

Obwohl die „Hauptnutzer“ eines Depots natürlich die Exponate selbst sind und das Raumklima speziell auf deren Bedürfnisse angepasst ist, muss dennoch auch auf die gelegentliche Nutzung durch das Personal und deren Wohlbefinden sowie Gesundheit geachtet werden. Im Gespräch mit Nutzern und Betreibern von Depots wird häufig der Luftwechsel thematisiert. Wie sich in den vorhergehenden Ergebnissen gezeigt hat, ist für ein möglichst stabiles Raumklima eine äußerst geringe Luftwechselrate förderlich. Für die Nutzung durch Personal gibt es jedoch Anforderungen an den hygienischen Mindestluftwechsel und einzelne Erfahrungsberichte zeigen, dass trotz dessen Einhaltung einige Personen subjektiv die Luftqualität als nicht ausreichend empfinden.

Es wird im Folgenden getestet, wie sich ein Anheben des Luftwechsels nur bei Aufenthalt von Personen auf die Stabilität des Raumklimas auswirkt. Dabei werden zwei Nutzungs-

szenarien angewandt, zum einen eine gelegentliche Nutzung, wenn beispielsweise einzelne Exponate gesichtet oder entnommen werden müssen und zum anderen ein Ausstellungswechsel, bei welchem über einen längeren Zeitraum im Lager gearbeitet werden muss.

*Nutzungsszenario „gelegentliche Nutzung“*

- 2 Personen
- 1x wöchentlich
- 2 Stunden
- Künstliches Licht
- Erhöhter Luftwechsel

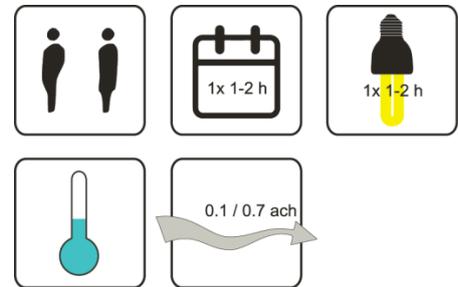


Abbildung 28: Nutzungsszenario gelegentliche Nutzung

*Nutzungsszenario „Ausstellungswechsel“*

- 2 Personen
- 4x wöchentlich
- 8 Stunden
- Künstliches Licht
- Erhöhter Luftwechsel

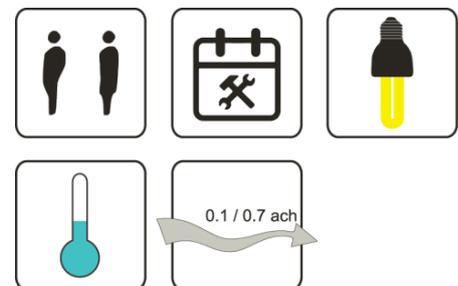


Abbildung 29: Nutzungsszenario Ausstellungswechsel

Exemplarisch werden für diese Variante in Abbildung 30 die Lufttemperatur für eine Woche (14.01. – 21.01.) und für die relative Feuchte für drei Wochen (07.01. – 27.01.) dargestellt. Hier lassen sich kaum merkliche Veränderungen der Raumlufttemperatur erkennen, da die zusätzlichen Wärmegewinne durch die zwei Personen und die energieeffiziente LED-Beleuchtung sehr gering sind im Vergleich zum großen Raumvolumen.

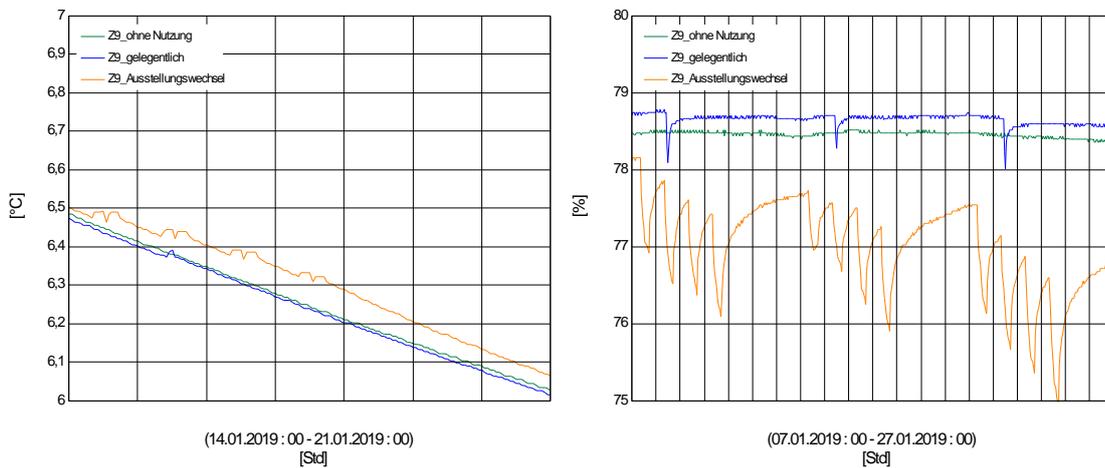


Abbildung 30: Simulationsergebnisse Detail Variante 5 - Nutzungsszenarien

Die Auswirkung der Nutzung auf die relative Feuchte fällt etwas stärker aus, was insbesondere auf den erhöhten Luftwechsel zurückzuführen ist. Bei der gelegentlichen, zwei-stündigen Nutzung sinkt die relative um knapp über einem halben Prozentpunkt ab. Beim Ausstellungswechsel, also einer täglichen Nutzung von 8 Stunden vier Tage die Woche, sinkt der Wert sprunghaft pro Tag um etwas mehr als einen Prozentpunkt. Somit liegen diese kurzfristigen Schwankungen noch innerhalb des tolerierten Bereichs.

#### 4.3.6. Variante 6: Heizen

Wie in den vorhergehenden Ergebnissen mehrfach schon erkennbar war, kann die rein passive Vorkonditionierung zwar sehr gut das Raumklima stabilisieren und ein Gleitklima erzeugen, jedoch wird der vorgegebene Klimakorridor nicht immer erreicht. Selbst wenn man auf die aktuelle Diskussion in Fachkreisen (vgl. 2.2.2) eingehen möchte und die untere Temperaturgrenze absenkt, würde insbesondere die relative Feuchte noch deutlich über den gewünschten 60 % r.F. liegen, was definitiv schädlich für die Exponate sein kann.

Daher werden im Folgenden iterativ Optionen zur zusätzlichen aktiven Temperierung getestet und optimiert. Hierbei wird insbesondere im Sinne eines konservatorischen Heizens (vgl. 2.5.4) die Erwärmung der Luft genutzt, um die relative Luftfeuchte abzusenkten. Im Zusammenhang mit dem angedachten Lüftungskonzept (vgl. 3.4) sind für die Temperierung der Luft dezentrale Lüftungsgeräte mit Heizregister vorgesehen.

Zunächst wird eine konstante Heizlast von 100 kW angesetzt und in Zone 4 (blau; Abbildung 31) beziehungsweise in den gesamten Zuluftzonen (orange) eingebracht. Beim letzten Fall wird zusätzlich in den Depotflächen eine konstante Heizlast von jeweils 10 kW angesetzt (rosa).

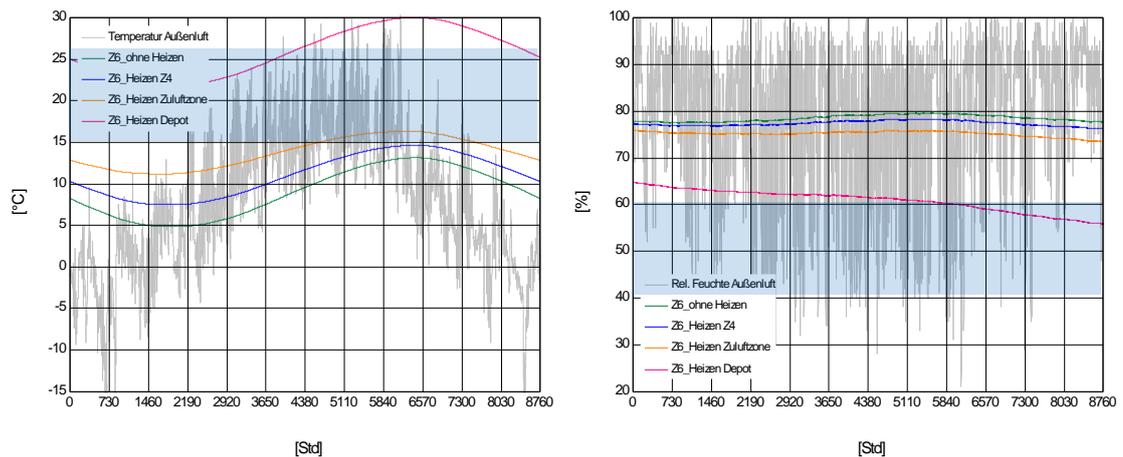


Abbildung 31: Simulationsergebnisse Variante 6 - Heizen

In den Ergebnissen lässt sich erkennen, dass die Heizlast in der Zuluftzone die Kurve der Lufttemperatur am Beispiel der Zone 6 um 5 - 10 K nach oben verschiebt. Jedoch kann die relative Feuchte dadurch nur um knapp 5 Prozentpunkte auf etwa 75 % r.F. abgesenkt werden. Das direkte Temperieren der Zuluft in den Depotflächen bewirkt eine deutlich effektivere Absenkung der Feuchteverhältnisse auf etwa 55 – 65 % r.F. Jedoch steigt nun in diesem Fall die Lufttemperatur im Sommer sogar über den Klimakorridor hinaus.

#### 4.3.7. Variante 7: optimierte Heizung und Entfeuchtung

Aus den Erkenntnissen der vorhergehenden Variante wird mit Hilfe des angepassten Simulationsmodells die Funktionalität der Heizung optimiert und anschließend noch verglichen mit einer Option inklusive Entfeuchtung. Im Vergleich zu Variante 6 wird auf eine Temperierung in der Zuluftzone verzichtet und im Ausgleich die Heizlast direkt in die Depotflächen auf jeweils 20 kW erhöht (grün; Abbildung 32).

Zum Vergleich wird noch eine Option mit einem klassischeren Ansatz simuliert (dunkelblau), bei welcher die Heizung über eine Solltemperatur von 15°C mit einer maximalen Heizleistung von 50 kW sowie eine zusätzliche Entfeuchtung mit einer maximalen Leistung von 100 kg/h und einem Grenzwert von 60 % r.F. gesteuert sind. Zudem ist in Abbildung 32 auch das rein passive Verhalten mit (orange) und ohne Erdkanal (hellblau) dargestellt.

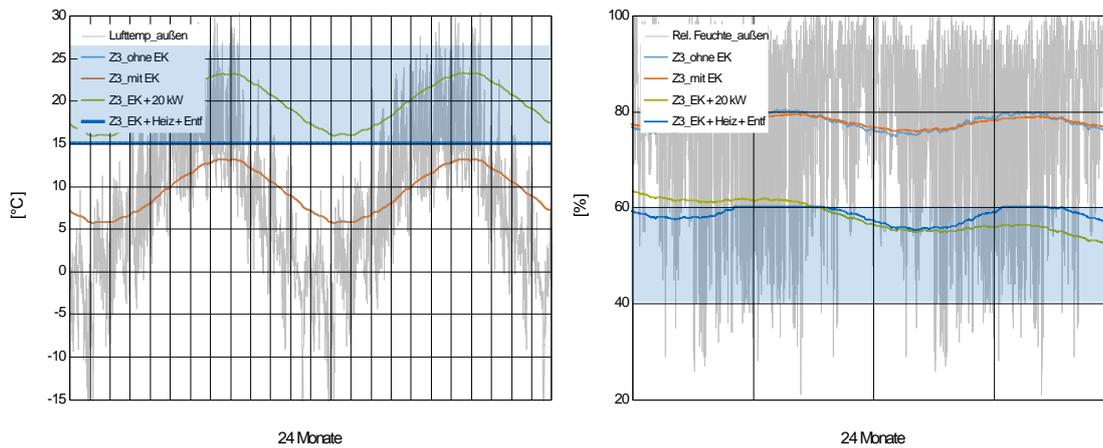


Abbildung 32: Simulationsergebnisse Variante 7 - optimierte Heizung und Entfeuchtung

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die optimierte Heizungskonstellation der Temperaturverlauf nun vollständig über den gesamte Simulationszeitraum von zwei Jahren im gewünschten Zielkorridor als Gleitklima mit  $20^{\circ}\text{C} \pm 4 \text{ K}$  verläuft. Auch die relative Luftfeuchte schwingt nur noch sehr geringfügig und im ersten Jahr nur knapp um den oberen Grenzwert von 60 % r.F. Im zweiten simulierten Jahr sinkt der Wert weiter ab und liegt nun vollständig im Zielkorridor bei 50 – 55 % r.F.

Im Vergleich dazu ist beim klassischen Ansatz bei der Lufttemperatur das „auf Strich fahren“ mehr als deutlich erkennbar. Bei der relativen Luftfeuchte werden jeweils im Sommer die Maxima durch die Entfeuchtungsanlage gekappt. Die beiden Graphen für den passiven Betrieb dienen nur als Referenz für den Ausgangspunkt der Optimierungen. Für die relative Luftfeuchte kann auch hier nochmals die Glättung der Kurve durch den Erdkanal und das Puffermaterial erahnt werden, was aber in den vorhergehenden Varianten mehr im Detail gezeigt wurde.

## 4.4. Zukunftswetterdaten

Museumsdepots sind aufgrund ihres Sammlungsauftrages darauf ausgelegt, möglichst lange Kulturgüter sicher verwahren zu können. Damit stellt sich für ein Gebäudekonzept natürlich auch die Frage nach der Lebensdauer des Gebäudes, welche möglichst maximiert werden sollte. Daher werden abschließend noch Simulationen mit prognostizierten Zukunftswetterdaten durchgeführt.

### 4.4.1. IPCC Szenarien

Ein Versuch, Zukunftsprognosen zum Klimawandel zu generieren sind die sogenannten IPCC Emissions-Szenarien vom Intergovernmental Panel on Climate Change der Vereinten Nationen [22]. In Abbildung 33 werden diese Szenarien dargestellt mit deren prognostiziertem Verlauf der Treibhausgasemissionen (links) und der erwarteten Erwärmung der Erdoberfläche (rechts).

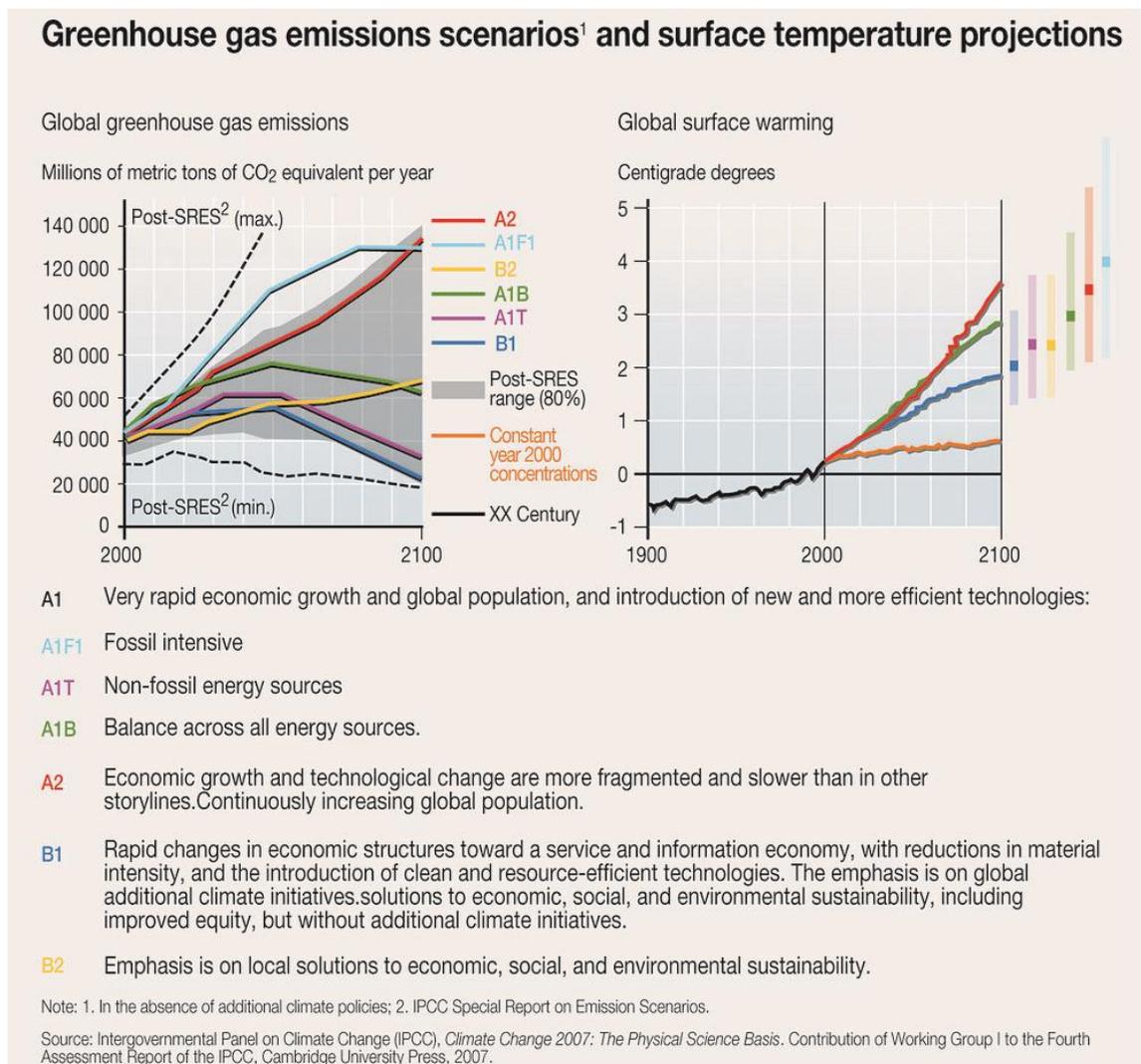


Abbildung 33: IPCC Szenarien zur Treibhausgasemission und Oberflächenerwärmung [23]

#### 4.4.2. Zukunftswetterdatensätze

Mit Hilfe der Software Meteonorm können für den Standort München Wetterdatensätze erzeugt werden, welche die prognostizierten Veränderungen der IPCC Szenarien berücksichtigen. Dementsprechend wurde für den Worst Case das Szenario A2 gewählt und für das Jahr 2020 – als Referenz – sowie für das Jahr 2100 die Wetterdaten erzeugt.

In der nachfolgenden Tabelle 5 sind für die beiden Zukunftswetterdatensätze sowie für das zuvor verwendete Feuchtereferenzjahr die Maximal-, Mittel- und Minimalwerte für die Lufttemperatur sowie für die relative Luftfeuchte aufgelistet.

Tabelle 5: Vergleich Zukunftswetterdaten

	Feuchtereferenzjahr	A2 2020	A2 2100
<b>Temperatur [°C]</b>			
<b>Max.</b>	30,6	31,1	37
<b>Mittel</b>	7,99	9,87	12,82
<b>Min.</b>	-17,9	-15	-9,7
<b>Relative Feuchte [%]</b>			
<b>Max.</b>	100	100	100
<b>Mittel</b>	78,18	71,72	71,7
<b>Min.</b>	21	23	25

Bei den Temperaturwerten ist klar der Anstieg durch die Klimaerwärmung erkennbar. Aber auch vom Feuchtereferenzjahr zum Datensatz für 2020 ist schon eine Erhöhung von knapp 2 K im Mittel ersichtlich. Dies deckt sich jedoch auch mit den Wetteraufzeichnungen aus den letzten Jahren in München, wo im Mittel schon über 11°C gemessen wurde. Hier ist aber auch auf den sogenannten Urban Heat Island Effekt hinzuweisen.

Bei der relativen Luftfeuchte sind zwar die Werte der beiden prognostizierten Datensätze nahezu identisch, wenn man jedoch den Temperaturanstieg berücksichtigt, bedeutet dies eine deutlich höhere absolute Luftfeuchte. Der Vergleich zum Feuchtereferenzjahr ist an dieser Stelle kritisch zu hinterfragen, da die Datengrundlage eine ganz andere ist.

### 4.4.3. Simulationsergebnisse

In den simulierten Verläufen (Abbildung 34) zeichnet sich die Klimaerwärmung durch einen Temperaturanstieg von knapp 1 K auch im Innenraumklima ab. Bei der relativen Luftfeuchte wirkt sich die Veränderung noch stärker aus. Hier steigen die Werte um knapp 5 Prozentpunkte, obwohl die relative Feuchte der Außenluft sich nicht erhöht. Dies ist wie zuvor schon angedeutet auf die höhere Feuchtekapazität von wärmerer Luft und dadurch eine zu erwartende höhere absolute Luftfeuchte zurückzuführen.

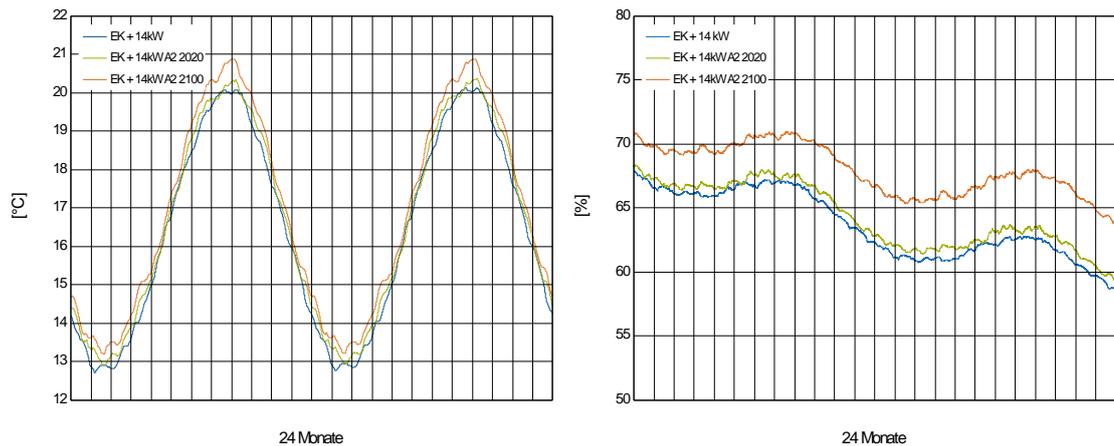


Abbildung 34: Simulationsergebnisse Zukunftsdatenätze

## 5. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und Brandschutz

Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung des Low-Tech-Gebäudekonzeptes für ein Museumsdepot werden im Folgenden noch die Aspekte Wirtschaftlichkeit und Brandschutz behandelt. Aufgrund der konzeptionellen Herangehensweise und entsprechend der Fokussierung auf die raunklimatische Betrachtung können hier jedoch keine detaillierten Aussagen getroffen werden.

### 5.1. Kostenabschätzung

Einer der Kernaspekte des vorgestellten Low-Tech-Gebäudekonzeptes ist das Lüftungskonzept mit einer passiven, hygrothermischen Vorkonditionierung im Erdkanal sowie der dezentralen aktiven Konditionierung der Zuluft für die Depotflächen. Daher wird im Folgenden versucht, anhand einer sehr groben Kostenabschätzung den finanziellen Mehraufwand für die Investition zu überschlagen.

#### 5.1.1. Statistische Kostenkennwerte BKI 2019

Um in dieser konzeptionellen Phase überhaupt eine grobe Abschätzung der Kosten leisten zu können, werden aktuelle statistische Kostenkennwerte der BKI Kostenplanung herangezogen [24]. Hierfür stehen beim Neubau Werte für das Gesamtgebäude [25], für Bauelemente [26] und für einzelne Positionen [27] zur Verfügung.

#### 5.1.2. Kostenschätzung Bauwerk gesamt


Abbildung 35: Kostenschätzung Bauwerk

Um die zusätzlichen Kosten einzelner Maßnahmen in Relation zu den Gesamtkosten setzen zu können, wird zunächst eine überschlägige Abschätzung der Kosten für das gesamte Bauwerk getätigt. Dazu werden statistische Kostenkennwerte für *Bibliotheken, Museen und Ausstellungen* [25, S. 806] angewandt. Somit

ergeben sich über den Mittelwert pro Bruttorauminhalt für die Kostengruppen 300 und 400 (Bauwerk) knapp **143 Mio. €**.

### 5.1.3. Kostenschätzung Erdkanal



Abbildung 36: Kostenschätzung Erdkanal

Für die zusätzlichen Kosten durch den Erdkanal werden die zusätzlichen Außen- und Innenwände sowie der nötige Aushub und die Zwischendecke berücksichtigt. Die Bodenplatte verschiebt sich nur um die Höhe des Erdkanals nach unten. Dafür werden Kennwerte für folgende Bauelemente der Kategorie *Bibliotheken, Museen*

*und Ausstellungen* verwendet [26, S. 282]: Herstellung Baugrube/Erdbau, tragende Außenwände, tragende Innenwände und Deckenkonstruktionen. Hieraus ergibt sich eine geschätzte Summe von knapp **2,5 Mio. €** für die zusätzlichen Kosten des Erdkanals.

### 5.1.4. Kostenschätzung Puffermaterial

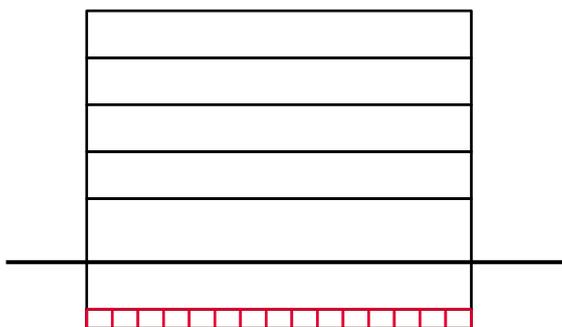


Abbildung 37: Kostenschätzung Puffermaterial

Um den Mehraufwand des zusätzlichen Puffermaterials im Erdkanal abzuschätzen, werden statistische Kostenkennwerte für einzelne Positionen genutzt, um die einzelnen Baumaterialien abzubilden [27, 150, 154, 377]: Innenwand Porenbeton nichttragend, Lehmputz Innenwand zweilagig, Innenwand Kalksandstein. Daraus

ergeben sich je nach verwendetem Baustoff Kosten von **290k €** (Porenbeton) bis **690k €** (Lehmputz).

### 5.1.5. Kostenschätzung Lüftungsanlage

Ein weiterer wichtiger Kostenfaktor bezogen auf das vorgeschlagene Gebäudekonzept ist die Lüftungsanlage. Hier ist zu erwarten, dass durch die Low-Tech-Ansätze die Anlagentechnik deutlich einfacher ausgelegt werden kann und dadurch sowohl Betriebs-, Wartungs- aber auch Investitionskosten eingespart werden können. Jedoch ist zu diesem Stadium eine genaue Kostenschätzung nicht möglich. Um dennoch einen Richtwert zu veranschlagen, wird aus den statistischen Kostenkennwerten für Gebäude die Kostengruppe 430 für Raumluftechnische Anlagen herangezogen [25, S. 807].

Wird vereinfachend angenommen, dass durch die Low-Tech-Strategien statt dem höheren Kostenkennwert von 244 €/m<sup>2</sup> Bruttogrundfläche der Mittelwert von 122 €/m<sup>2</sup> angesetzt werden kann, halbieren sich die Kosten von über **14 Mio. €** auf gut **7 Mio. €**. Jedoch

sind die Datengrundlage für diese Werte Gebäude, welche höhere Anforderungen an die Luftwechselraten haben und somit die Anlagen größer ausgelegt werden müssen.

Von Experten aus der Praxis kann jedoch bestätigt werden, dass die spezifischen Kosten von raumluftechnischen Anlagen pro Luftvolumenstrom für Vollklimaanlagen im Vergleich zu teilklimatisierenden Anlagen doppelt so hoch liegen. Dies bestätigt zumindest die relative Kostensteigerung der BKI-Werte um 100 %, auch wenn die absoluten Zahlen für ein Museumsdepot wohl niedriger ausfallen.

### 5.1.6. Zusammenfassung Kostenschätzung

Die zuvor beschriebenen Annahmen zur groben Kostenabschätzung der Low-Tech-Strategien werden in der nachfolgenden Tabelle 6 nochmals zusammengefasst. Hier sind für die jeweiligen Kategorien (Gesamt, Erdkanal, Puffermaterial und Lüftungsanlage) die gewählten Kostengruppen und deren Kennwerte aufgeführt. In der letzten Spalte sind zudem die Summen beziehungsweise Differenzen ergänzt.

Tabelle 6: Übersicht Annahmen Kostenschätzung

Kategorie	KG	Anmerkung	spez. Kosten	Summe / Differenz
<b>Gesamt</b>	KG 300 + 400	„Bibliotheken, Museen und Ausstellungen“; Mittel	142.800.800 €	<b>142.800.800 €</b>
<b>Erdkanal</b>	KG 311, 331, 341, 351	Baugrube, tragende AW / IW, Deckenkonstruktion	2.536.400 €	<b>2.536.400 €</b>
<b>EK + Puffer</b>	KG 342	+ Puffer Porenbeton	289.575 €	<b>2.825.975 €</b>
	KG 342, 345	+ Puffer Lehmputz	1.335.035 €	<b>3.226.115 €</b>
	KG 341	+ Puffer Kalksandstein	315.900 €	<b>2.852.300 €</b>
<b>RLT</b>	KG 430	RLT Anlagen; Mittel	7.320.000 €	-
	KG 430	RLT Anlagen; Hoch	14.640.000 €	<b>7.320.000 €</b>

Auf dieser Datengrundlage wird in Abbildung 38 die Kostenabschätzung graphisch dargestellt. Im oberen Diagramm werden die geschätzten Gesamtkosten, unterteilt in die einzelnen Kostengruppen und für die Fälle mit und ohne Low-Tech-Strategien abgebildet. In der unteren Graphik wird der Ausschnitt der zusätzlichen Kosten durch Erdkanal, Puffermaterial und raumluftechnischer Anlage (RLT) detaillierter gezeigt.

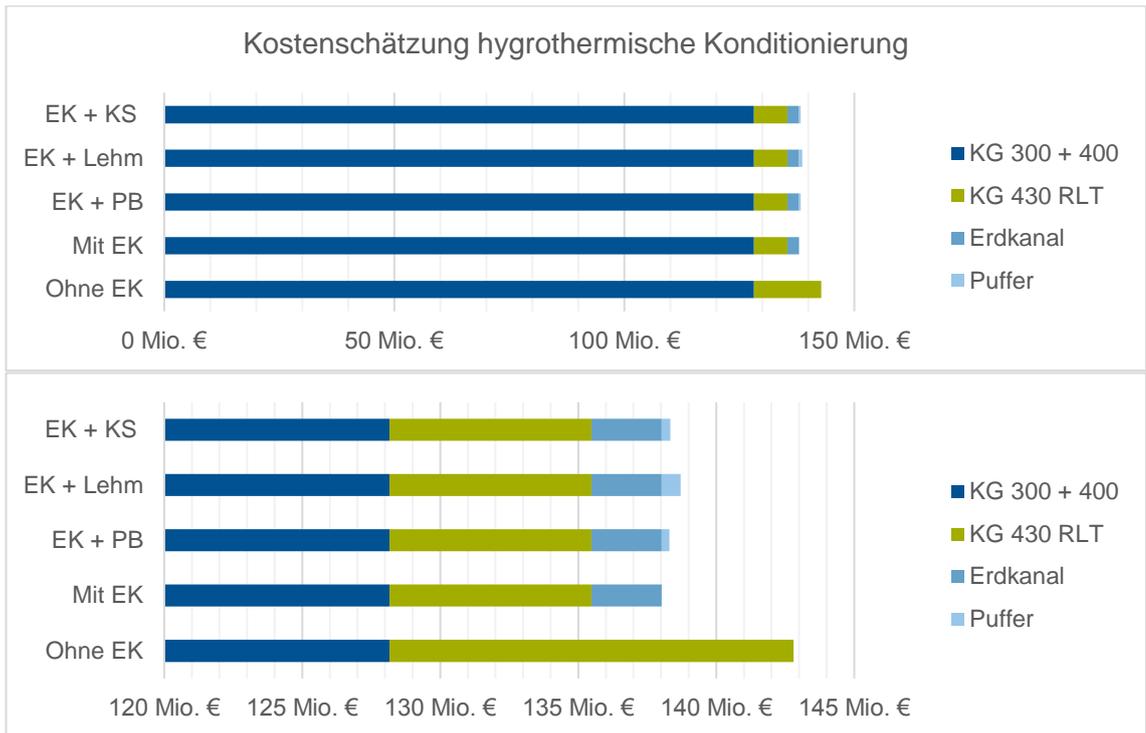


Abbildung 38: Kostenschätzung hygrothermische Konditionierung

## 5.2. Brandschutz

Die zu verwahrenden Exponate in Museumsdepots sind von unschätzbarem Wert, sowohl monetär als auch im gesellschaftlichen Kontext. Daher ist auf einen besonderen Schutz der Sammlungen zu achten. In den vorhergehenden Kapiteln wurde nun eingehend auf den Schutz durch konservatorisches Raumklima eingegangen. Jedoch zeigt der Brand in einer der angemieteten Depotflächen in Ingolstadt Ende 2018 [2], dass auch der Brandschutz einen wichtigen Stellenwert in der Konzeptionierung von Museumsdepots einnehmen muss.

### 5.2.1. Modulare Bauweise

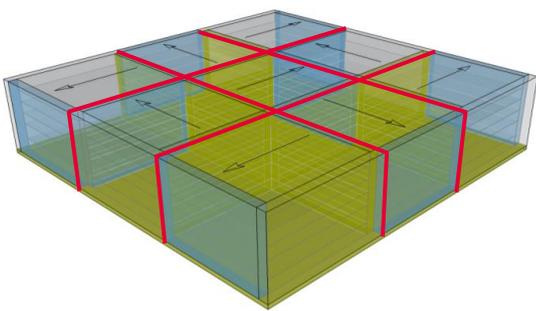


Abbildung 39: Modulare Bauweise; innere Brandwände

Die modulare Bauweise fügt sich gut in ein mögliches Brandschutzkonzept ein. Bei diesen Abmessungen und dieser Gebäudeklasse beträgt der Maximalabstand von Brandwänden 40 m [28, Art. 28]. Daher kann die Unterteilung in Module gleichzeitig zur brandschutztechnischen Abschottung mittels innerer Brandwände genutzt

werden. Somit kann das Risiko einer großflächigen Brandausbreitung zwischen den einzelnen Modulen verringert werden.

Zudem hat die Erfahrung nach dem Brand in Ingolstadt gezeigt, dass kleinere Brandabschnitte – wie in diesem Fall eine Fläche von 30 x 30 m – im Brandfall den Vorteil haben, dass die Anzahl beschädigter Exponate viel geringer ist. Hier ist nicht nur die direkte Brandbelastung, sondern insbesondere auch die Beschädigung durch Ruß zu erwähnen.

### 5.2.2. Luftführung und Brandabschnitte

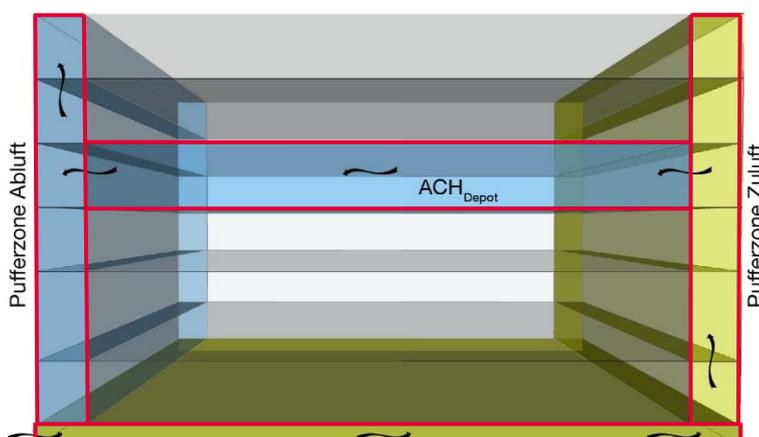


Abbildung 40: Luftführung und Brandabschnitte

Ein weiterer brandschutztechnisch relevanter Aspekt in Bezug auf das Low-Tech-Gebäudekonzept ist die gewählte Luftführung durch den Erdkanal und über die Pufferzonen für eine hygrothermische Vorconditionierung der Zuluft.

Pro Modul sind sowohl Erdkanal als auch jede Depotfläche pro Geschoß als einzelner Brandabschnitt auszuführen. Dies würde bei einer klassischen Lüftungsanlage mit Kanalnetz bedeuten, dass bei jeder Durchdringung der Lüftungskanäle zwischen Brandabschnitten, also auch zwischen jedem Geschoß ein Brandschott nötig wäre.

Bei der direkten Luftführung über die Pufferzonen kann neben dem Vorteil der zusätzlichen hygrothermischen Speichermasse auch auf das Kanalnetz verzichtet werden. Jedoch muss dadurch vertikal ein Luftaustausch zwischen den Geschoßen in den Pufferzonen ermöglicht werden. Dies kann als Atrium ausgelegt werden, welche in der Bauordnung als nicht geregelter Sonderbau behandelt werden. Dadurch können diese Bereiche wie einen notwendigen Treppenraum als vertikalen Brandabschnitt ausgeführt werden (siehe Abbildung 40).

Somit wären in diesem Konzept nur die Luftdurchführung zwischen Erdkanal und Pufferzone sowie die dezentral ausgeführten Lüftungsgeräte pro Depotfläche brandschutztechnisch getrennt auszuführen, was die Komplexität deutlich reduziert.

## 6. Fazit

Im Rahmen dieser Studie wurde basierend auf der Analyse, Adaptierung und Ergänzung von bestehenden Ansätzen ein Low-Tech-Gebäudekonzept für Museumsdepots (Abbildung 41) entwickelt und anhand von hygrothermischen Gebäudesimulationen validiert und optimiert.

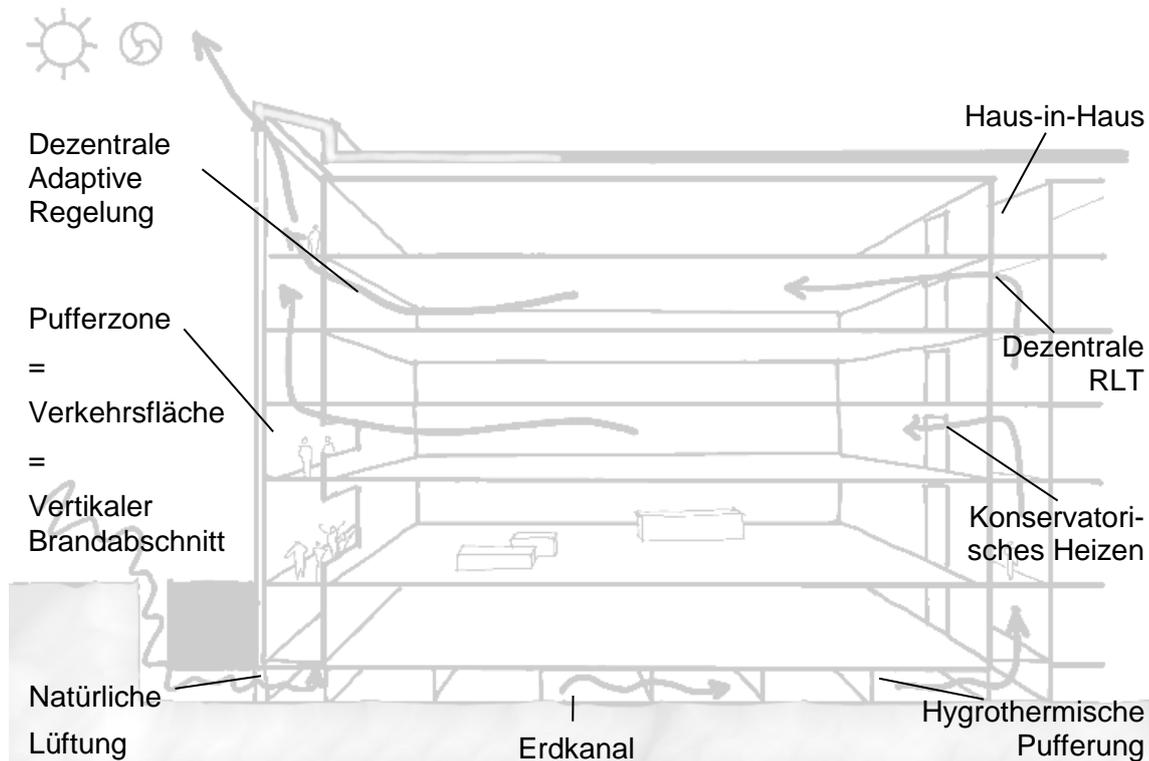


Abbildung 41: Fazit Low-Tech-Gebäudekonzept

Nachfolgend werden die wichtigsten Low-Tech-Strategien und Erkenntnisse aus der Studie zusammengefasst und darauf aufbauend Empfehlungen für eine Planung gefolgt. Die vier Kernaspekte dabei sind:

- Hygrothermische Pufferung
- Dezentrale RLT und konservatorisches Heizen
- Haus-in-Haus Konzept
- Vertikale Brandabschnitte

## 6.1. Hygrothermische Pufferung

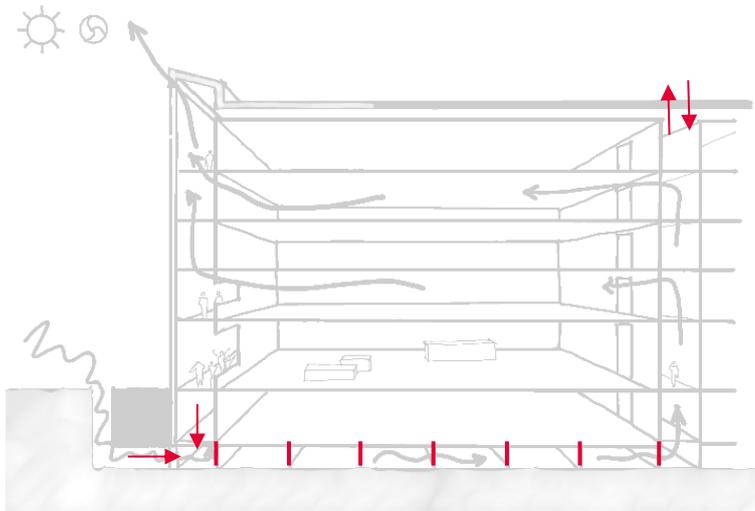


Abbildung 42: Schema hygrothermische Pufferung

Eine zentrale Low-Tech-Strategie ist die passive, hygrothermische Vorkonditionierung der Zuluft mittels Erdkanal und zusätzlichem Puffermaterial.

Die Simulationsergebnisse (vgl. 4.3.4) zeigen, dass durch die hohe thermische und hygrische Speichermasse die Raumklimakur-

ven erheblich geglättet werden und auch saisonale Pufferung von Temperatur wie Feuchte möglich sind. Dabei bewirkt insbesondere auch die ungedämmte Bodenplatte, dass ein Wärmeaustausch mit dem angrenzenden Erdreich saisonale Schwankungen ausgleicht.

Durch das Einbringen von zusätzlichem hygrisch aktivem Puffermaterial im Erdkanal wird die Amplitude der relativen Feuchte im gesamten Jahresverlauf um etwa 5 Prozentpunkte reduziert und auch kurzzeitige Schwankungen fallen um bis zu 10 Prozentpunkte geringer aus (siehe Seite 37).

Optimierungspotential besteht hier in einer adaptiven Regelung des Luftvolumenstroms sowie der Möglichkeit eines Bypasses und eines Umluftbetriebs. Hierdurch könnte gezielt je nach Innen- und Außenklimabedingungen (Lufttemperatur, relative Feuchte und absolute Feuchte) der Luftwechsel geregelt werden, um die Werte der Zuluft noch zu optimieren. Denkbar wäre beispielsweise ein gezieltes Entladen des Feuchtepuffers bei passenden Außenwerten oder aber ein Umluftbetrieb bei ungünstigen Feuchteverhältnissen außen.

## 6.2. Dezentrale RLT und konservatorisches Heizen

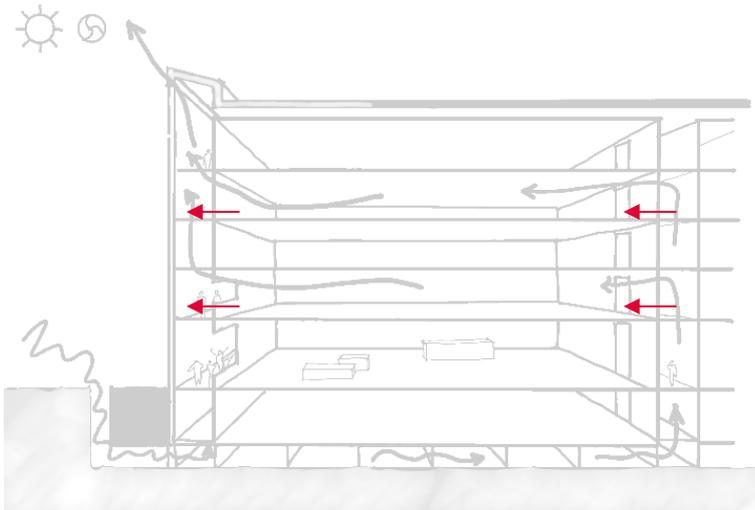


Abbildung 43: Schema dezentrale RLT und konservatorisches Heizen

Um die Komplexität des Systems zu reduzieren und die passive hygrothermische Vorkonditionierung der Zuluft in Erdkanal und Pufferzone zu ermöglichen, sind dezentrale raumlufttechnische Anlagen zur Belüftung der Depotflächen vorgesehen.

Diese ermöglichen gleichzeitig eine adaptive und bedarfsgesteuerte Regelung individuell für alle Lagerräume. Somit kann auf spezifische konservatorische Anforderungen von Exponaten eingegangen werden, wenn diese dementsprechend sortiert gelagert werden. Aber auch die Anpassung der Raumklimawerte bei Nutzung durch Personal kann so einfacher und gezielter umgesetzt werden (vgl. 4.3.5)

Zudem kann durch die passive Vorkonditionierung und das allgemeine Gebäudekonzept auf eine zentrale Vollklimaanlage verzichtet werden, was die Komplexität und dadurch Fehleranfälligkeit der Anlage erheblich reduziert und einen robusten Betrieb ermöglicht. Gleichzeitig können so Investitions- und Betriebskosten eingespart werden (siehe 5.1.5).

Im Sinne des konservatorischen Heizens (vgl. 2.5.4) wird gezielt die passiv vorkonditionierte Zuluft bei Bedarf zusätzlich aktiv über Heizregister in den dezentralen RLT-Geräten erwärmt und so die relative Luftfeuchte abgesenkt. Dadurch kann vollständig auf eine komplexe und teure Entfeuchtungsanlage verzichtet werden, welche zudem schwer exakt zu regeln ist und häufig Hygieneprobleme mit sich bringt.

Ein weiterer Synergieeffekt ist bei diesem Konzept der Verzicht auf ein wassergeführtes Heizungssystem in den Depotflächen, wodurch mögliche Leckagen und dadurch potentielle Schädigungen der Exponate vermieden werden.

### 6.3. Haus-in-Haus Konzept

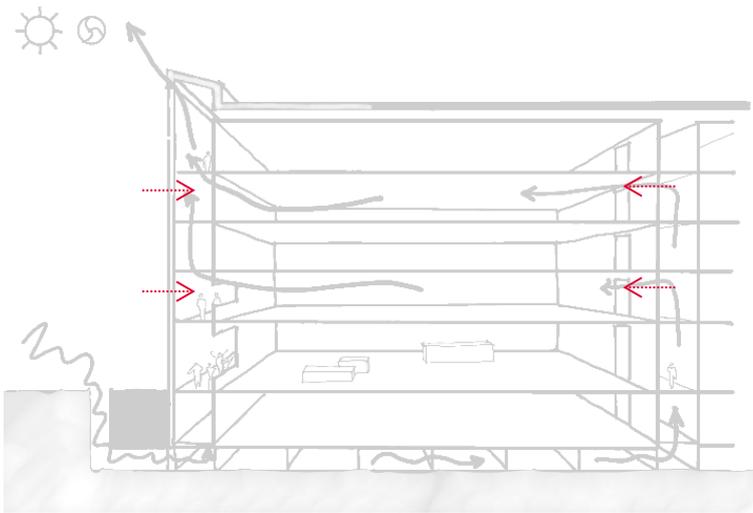


Abbildung 44: Schema Haus-in-Haus Konzept

Eine Grundvoraussetzung für das gesamte Low-Tech-Gebäudekonzept ist die kompakte und klimatisch abgeschottete Bauweise und im Speziellen das Haus-in-Haus Prinzip.

Durch die hoch wärmege-dämmte, massive und luft-dichte Bauweise und die Wirkung der Pufferzonen wird ein sehr gleichmäßi-

ges Gleitklima ermöglicht. Dadurch und mit Unterstützung der passiven, hygrothermi-schen Vorkonditionierung kann auf eine aufwendige Raumklimatisierungsanlage ver-zichtet werden.

Neben dem Verzicht auf Fensteröffnungen in der Gebäudehülle und der massiven, dop-pelschaligen Bauweise spielen insbesondere der Infiltrationsluftwechsel (4.3.2) und die Luftwechselrate der Belüftung (4.3.3) eine Rolle. Durch eine bedarfsgesteuerte Rege-lung des Luftwechsels bei Benutzung durch Beschäftigte, kann der Luftwechsel im Nor-malbetrieb auf ein Minimum reduziert und so das Raumklima stabilisiert werden.

## 6.4. Vertikale Brandabschnitte

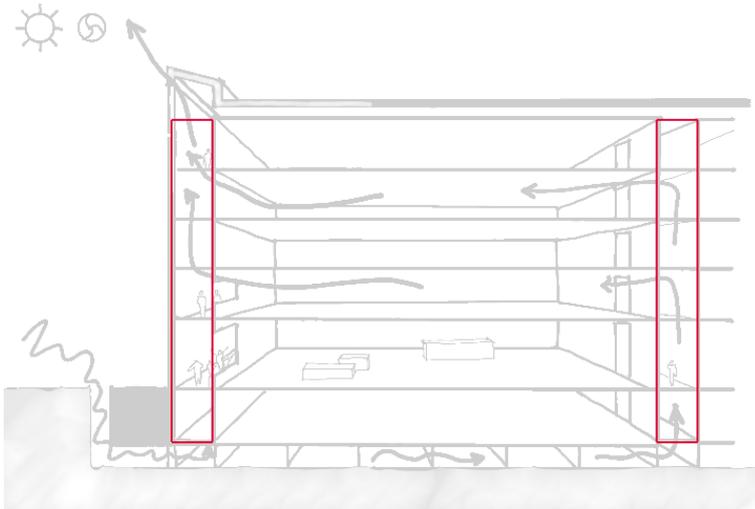


Abbildung 45: Schema vertikale Brandabschnitte

Um eine langfristige und sichere Bewahrung der Exponate sicherzustellen, ist neben dem Raumklima auch der Brandschutz von großer Bedeutung. Insbesondere mit der vertikalen Luftführung direkt in den Pufferzonen, ist ein integrales Brandschutzkonzept elementar.

Die Pufferzonen sind ähnlich wie Atrien durch ihre offene, vertikale Luftführung als brandschutztechnisch nicht geregelter Sonderbau anzusehen und können wie ein notwendiger Treppenraum als vertikaler Brandabschnitt ausgelegt werden (siehe Abbildung 45). Somit wird ein Modul brandschutztechnisch folgendermaßen unterteilt: Erdkanal, Pufferzone Zu- und Abluft und Depotfläche je Geschöß.

Durch die Wahl der Modulgrundfläche von 30 x 30 m ist zudem die Größe der Brandabschnitte so gewählt, dass im Brandfall nur eine begrenzte Anzahl an Exponaten beschädigt werden kann und das Risiko für einen Brandüberschlag in andere Bereiche reduziert wird.